FH AACHEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

FH Aachen

Fachbereich FB10 Energietechnik

Studiengang Energy Systems

Masterarbeit

Automatisierung und effizienter Betrieb des 10K-Moderatorkryostaten auf Basis von Thermo- und Fluiddynamiksimulationen

vorgelegt von	**Ruben Thomas Rings**
	Matrikel-Nr. **3130065**
Referent:	Prof. Dr. Stefan Bergfeld
Korreferent:	Dr. Ulrich Rücker
Externer Betreuer:	Dr. Ulrich Rücker
Datum:	02 Juni 2026
Verteidigung:	xx Juni 2026

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen.

Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Mönchengladbach, im Juni 2026

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird der „Kryostat für einen kompakten kryogenen Neutronenmoderator“, welcher im Zuge der Doktorarbeit von Alexander Schwab für das HBS-Projekt entworfen wurde, automatisiert. Die Arbeit baut auf der Bachelorarbeit „Aufbau und Inbetriebnahme des Para-Wasserstoff-Kryostaten für die High Brilliance Neutron Source (HBS)“ von Ruben Thomas Rings auf.

Das Jülich Center for Neutron Science (JCNS) baut mit dem HBS-Projekt eine neue beschleunigerbasierte Neutronenquelle im Forschungszentrum Jülich. Das Projekt des JCNS befindet sich zur Zeit am Beginn der Realisierungsphase. An der neuen Neutronenquelle sollen wissenschaftliche Experimente mit kalten und thermischen Neutronen durchgeführt werden. Der Kryostat ist Teil der Entwicklung kalter Moderatoren, die speziell auf die Bedürfnisse dieser Experimente aufbauten. Dabei soll der Moderatorkryostat bei der Entwicklung von neuen Moderatorgeometrien und dem Test dieser Geometrien mit verschiedenen Moderatorgasen dienen. Das Ziel ist die Entwicklung von Anlagen, die Neutronen auf ein gewünschtes niedriges Energieniveau abbremsen können, ohne für den Betrieb Spezialkenntnisse der Operateure zu benötigen.

Automatisierung und Betriebsoptimierung

Im Rahmen dieser Arbeit wird der bestehende Kryostat vollständig automatisiert. Alle funktionalen sowie sicherheitsrelevanten Features werden implementiert und dokumentiert. Die Automatisierung umfasst die Steuerung des Helium-Massenstroms über einen Massflow-Controller und ein Tieftemperatur-Nadelventil sowie die Überwachung und Regelung aller kritischen Betriebsparameter. Darüber hinaus wird der Betrieb des Systems analysiert und optimiert, um maximale Effizienz, Zuverlässigkeit und Sicherheit zu gewährleisten.

Numerische Simulation mit ANSYS Fluent

Um die internen Prozesse und Wärmetransportmechanismen des Kryostaten detailliert zu untersuchen, wird ein umfassendes Simulationsmodell mit ANSYS Fluent entwickelt.

Kühlmedium und Betriebsbedingungen:

Das Kühlsystem basiert auf flüssigem Helium, das mit einem Überdruck von 0,1 bis 0,5 bar durch den Moderatorkryostaten gepresst wird. Der Massenstrom wird durch einen Massflow-Controller am Auslass reguliert und ist auf maximal 0,6 g/s begrenzt. Die Rohrleitungen weisen einen Mindestdurchmesser von 4 bis 6 mm auf, und der Kryostat operiert in einer Vakuumkammer, um den Wärmeeintrag durch Konvektion zu vermeiden.

Simulationsmodell und Wärmetransport:

Das Simulationsmodell bildet die Verflüssigung und Verfestigung wasserstoffhaltiger Moderatormaterialien (Wasserstoff, Methan, Ethan etc.) ab. Die Wärmeeintrage werden detailliert erfasst: Zum einen werden die Schweißverbindungen an den Außenplattenschnittstellen modelliert, um realistische Wärmeströme an den Übergängen zur äußeren Struktur abzubilden. Zum anderen wird die Wärmestrahlung von der Außenwand des Vakuumbehälters durch die Multi-Layer-Isolation mittels Wärmeflux-Randbedingungen auf die Außenflächen der Rohre berücksichtigt. Dies ermöglicht eine realitätsnahe Vorhersage der thermischen Verhältnisse im Kryostaten.

Fokus und Ausblick

Die durchgeführte Simulation dient der umfassenden Erforschung und Visualisierung der inneren Funktionsmechanismen des Kryostaten. Ein besonderer Fokus liegt auf der Identifikation von Optimierungspotenzialen und der Bereitstellung einer soliden

Grundlage für zukünftige Variationen der Moderatorgeometrie. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen zur weiteren Verbesserung und Skalierung des Moderator-Designs für die HBS-Neutronenquelle beitragen.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis **xi**

Tabellenverzeichnis **xv**

Nomenklatur **xvii**

1 Einführung **1**
1.1 Motivation 2
1.1.1 Neutronen 2
1.1.2 Wozu Neutronen? 3
1.1.3 Neutronenquellensterben 3
1.1.4 HBS-Projekt 4
1.1.5 Beschleunigerbasierte Neutronenquellen 4
1.1.6 Neutronenmoderation 9
1.2 Zielsetzung 9

2 Grundlagen **11**
2.1 Neutronen 11
2.2 Thermische Neutronenmoderation 12
2.3 Kalte Neutronenmoderation 12
2.3.1 Moderatoren 13
2.3.2 Neutronenleiter 14
2.4 Stoffgrundlagen 15
2.4.1 Helium 15
2.4.2 Stickstoff 15
2.4.3 Methan 15
2.4.4 Wasserstoff 16
2.5 Wärmeübertragung in kryogenen Systemen 16
2.5.1 Wärmestrahlung 16
2.5.2 Wärmeleitung 19

3 Aufbau des 10K-Moderatorkryostaten **25**
3.1 Entwurf und Bau des 10K-Moderatorkryostaten 25
3.2 Konstruktion 25
3.3 Begriffdefinitionen der Konstruktion 25

3.4 Prozessbeschreibung 27
3.4.1 Neutronenweg 29
3.5 Kryostat 31
3.5.1 Speicherprogrammierbare Steuerung (Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)) 36
3.5.2 Moderatorplug 38
3.6 Physikalische Mess- und Regelungstechnik 46
3.6.1 Bronkhorst-Massedurchflussregler 46
3.6.2 Formeln für thermische Massestromsensoren 47
3.6.3 Vakuum-Druckmessung mit MPT-200 und PPT-200 49

4 Automatisierung des Moderatorkryostaten 51
4.1 Das Automatisierungskonzept 51
4.1.1 Das Regelungskonzept 52
4.2 Umsetzung des Automatisierungskonzeptes 54
4.2.1 Vakuumpumpen/Ventile - Steuerung (Pump) 54
4.2.2 Pump and purge 55
4.2.3 Prepare 55
4.2.4 Standby 56
4.2.5 Cooldown 57
4.2.6 Shutdown 57
4.2.7 Emergencyshutdown 58
4.2.8 Auto-Cooldown 59
4.2.9 Zusätzliche Überwachungsfunktionen und Sicherheit 60

5 Umsetzung und Erweiterung des Regelkonzeptes 63
5.1 Druckregelung mit Druckregler (Pressure Controller) $(PC)_{He}$ und Buerkert-Nadelventil 63
5.2 Temperaturregelung 65
5.2.1 Reglerauslegung und Validierung 65
5.2.2 Erweiterung der Regelstruktur 68
5.2.3 Problembeschreibung und Hypothese 71
5.2.4 Erweiterung der Tieftemperatur-Regelstruktur 72

6 Optimierung der Betriebsparameter 75
6.1 Erste Maßnahmen 75
6.2 Finales Regelkonzept 77
6.3 Wasserstoffmessungen 78
6.4 Problematik mit PPT-200 und Scrollpumpe im Zusammenhang mit Wasserstoff 81
6.5 Auswertung der Betriebspunkte 82

7 Simulationsmodell zum Wärmetransport im Kryostaten 87
7.1 Modellaufbau . . . 87
7.1.1 Methan: Apparent heat capacity method . . . 87
7.1.2 Helium: Turbulenzmodell – k-ω SST . . . 89
7.1.3 Prismenschichten . . . 90
7.1.4 User-Defined-Functions . . . 91
7.1.5 User Defined Function (UDF): Wärmestrahlung . . . 92
7.1.6 UDF: Spacer . . . 93
7.1.7 Mesh . . . 95
7.2 Simulationen und Simulationsergebnisse . . . 99
7.2.1 Umsetzung des $10\,\mathrm{K}$ Arbeitspunktes in der Simulation . . . 99
7.2.2 Erstes Ergebnis . . . 99
7.2.3 Erweiterung der Spacer-UDF um Wärmeleitung zwischen den Rohren (V2) 103
7.2.4 Zweites Ergebnis . . . 106

8 Fazit 109
8.1 Zusammenfassung der Ergebnisse . . . 109
8.2 Ausblick . . . 111
8.3 Anregungen für Verbessungen . . . 111

Danksagung 113

Literaturverzeichnis 115

A Anhang 1: Messdaten 121
A.1 Test 1: Methan (mit Helium gekühlt) . . . 121
A.2 Messung 1: Methan (mit Helium gekühlt) . . . 128
A.3 Messung 2: Methan (mit Helium gekühlt) . . . 136
A.4 Messung 3: Wasserstoff (mit Helium gekühlt) . . . 144
A.5 Messung 3: Wasserstoff (mit Helium gekühlt) . . . 152

B Anhang 2: Quellcode der Simulation 161
Materialdaten: Aluminium 5083-O . . . 161
Materialdaten: Methan (Feststoff) . . . 164
Materialdaten: Invar 36 . . . 166
Materialdaten: Al 6061-T6 und Edelstahl SS304 . . . 169
UDF: Emissivität Invar 36 . . . 174
UDF: Wärmefluss MLI Lockheed . . . 177
UDF: Wärmefluss Vespel-SP-1-Spacer . . . 179
UDF: Wärmefluss Moderatorkopf-Spacer (kombiniert) . . . 184

Abbildungsverzeichnis

1-1 CAD: Target Station 7
1-2 CAD: offene Target Station 7
1-3 Target Station von oben 8

2-1 ^{58}Ni-Neutronenleiter des para-Wasserstoff-Kryostaten[33] 14
2-2 In der Simulation verwendete Stoffdaten: Wärmekapazität Aluminium 5083-O 19
2-3 In der Simulation verwendete Stoffdaten: Wärmekapazität Edelstahl 304 20
2-4 In der Simulation verwendete Stoffdaten: Wärmeleitfähigkeit Aluminium 5083-O 20
2-5 In der Simulation verwendete Stoffdaten: Wärmeleitfähigkeit Edelstahl 304 21
2-6 In der Simulation verwendete Stoffdaten: Wärmeleitfähigkeit Invar Fe-36Ni 21

3-1 Vereinfachtes Diagramm der Prozessbeschreibung 28
3-2 Target Station von oben (Abb. **1**-3) 29
3-3 Thermischer Moderator aus Polyethylene mit Neutronenreflektor aus Blei (s. Abb. **3**-12 für die Position des Moderatorplugs) 29
3-4 Inneres des Moderatorplugs 30
3-5 Schaltplan des Kryostaten 31
3-6 Schaltplan des Kryostaten ohne Pneumatik 32
3-7 Gesamter Aufbau des Kryostaten für den Betrieb (ohne Moderatorgasflasche, die steht im Gasschrank für explosive Gase) 33
3-8 (farbkodiert wie **3**-6) 37
3-9 CAD: Außenhülle der Vakuumisolierung des Kryostaten im Moderatorplug 38
3-10 CAD: Interne Leitungen und Moderatorbehältnis des Kryostaten 38
3-11 Moderatorplug vor der Target Station mit Einschub-Öffnungen 39
3-12 Moderatorplug innerhalb der Strahlungabschirmung (endet im thermischen Moderator (schwarz) innerhalb des Neutronenreflektors aus Blei (gräulich)) 39
3-13 Moderatorplug eingebaut in die Abschirmung der Targetstation (blau) der Neutronenquelle. Oben ist der Drucksensor MPT-200 (rot) 40
3-14 Moderatorvolumen innen um die eingezeichnete Zylinderachse im Moderator 41
3-15 Moderator ohne äußere Kappe - mäanderförmiger Kühlkanal auf der Hülle des Moderatorvolumens 42

3-16 Moderatorgeometrie mit Moderatorgasleitungen 42
3-17 Moderatorgeometrie mit Kühlgasleitungen 42
3-18 Wärmeleitungsmodell des Kryostaten 44
3-19 CAD: Neutronen- und Strahlungsabschirmung des Moderatorplugs (farbige Platten = BorPE-Platten, graue Platten dazwischen = Bleiplatten) . 45
3-20 Funktionsprinzip eines thermischen Massendurchflussmessers 47

4-1 Moderatorgeometrie mit Sensorik und Heizungen im geöffneten Moderatorplug 53

5-1 Gleichgewichts-Kühlmitteldurchfluss als Funktion der Solltemperatur. . . 66
5-2 Test-Messung: Temperatur am Kühlgas-Ausgang der Moderatorgeometrie (ganze Messung im Anhang) 66
5-3 Test-Messung: Drucksensor 1: Moderatorgaseingang (ganze Messung im Anhang) 67
5-4 Test-Messung: Drucksensor 2: Moderatorgasausgang (ganze Messung im Anhang) 68
5-5 Polynom 6.Grades um $U_{\text{Transferheber}}$ druckabhängig zu steuern 70
5-6 Detailansicht der Methan-Messung vom 20.04.26 im Zeitbereich $t = 0{,}15$ bis $0{,}5$ h. Oben: Drucksensoren pt1 und pt2 (links) sowie Einstellspannung des Transferhebers (rechts). Unten: Helium-Massefluss des Masseflussregler (Mass Flow Controller) $(\text{MFC})_{\text{He}}$ (links) sowie die vier Temperatursensoren an Kühlgas-Eingang, Kühlgas-Ausgang, Moderator-Eingang und Moderator-Ausgang (rechts). 73
5-7 Messung 20.04.2026: Kryostattemperatur 74

6-1 Messung 22.04.2026: Auswertung der Betriebspunkte für $80\,\text{K}$, $60\,\text{K}$, $40\,\text{K}$, $30\,\text{K}$, $20\,\text{K}$, $15\,\text{K}$ und $10\,\text{K}$ mit gleitender Stabilitätsanalyse 76
6-2 Plot der Betriebspunkte 76
6-3 Messung 24.04.2026: Kryostattemperatur 78
6-4 Messung 24.04.2026: Kryostattemperatur, Ausschnitt um den Betriebspunkt 78
6-5 Messung 29.04.2026: Kryostattemperatur 79
6-6 Messung 29.04.2026: Kryostattemperatur, Ausschnitt um den Betriebspunkt 80
6-7 Messung 24.04.2026: Integral des Helium-Massenstroms 80
6-8 Messung 29.04.2026: Integral des Helium-Massenstroms 81
6-9 Extrahierter Betriebspunkt der Methan-Messung vom 20.04.26. Kreise: Kryostat-Temperatur der Betriebspunkte (links), Quadrate: MFC-He-Sollwert der Betriebspunkte (rechts). 83
6-10 Extrahierte Betriebspunkte der Methan-Messung vom 22.04.26. 83

6-11 Extrahierter Betriebspunkt der Wasserstoff-Messung vom 24.04.26. Die Betriebspunktsuche beginnt nach $t = 2{,}5\,\mathrm{h}$, um den Einschwingtransient nach dem Abkühlvorgang auszuschließen. 84
6-12 Extrahierter Betriebspunkt der Wasserstoff-Messung vom 29.04.26. . . 84
6-13 Extrahierter Betriebspunkt der Test-Messung. 85
6-14 Vergleich der extrahierten Betriebspunkte aller fünf Messungen sowie die ursprüngliche lineare Vorsteuerungskennlinie (1. Reglerauslegung, gestrichelt). 85

7-1 Simulationsdaten: Stoffdaten: Wärmeleitfähigkeit Methan 88
7-2 Test-Meshdaten: Rohrquerschnitt 4mm Innendurchmesser (Rohr gelb, Helium/Methan braun) 91
7-3 Computer Aided Design (CAD): Spacergeometrie am Moderator (effektive Pfadlänge: orange, Engstellenquerschnitt: schwarz, oben für Heliumleitungen 2 parallele Wärmepfade) 94
7-4 CAD: Spacergeometrien an den Helium-Leitungen (effektive Pfadlänge: orange, Engstellenquerschnitt: schwarz) 95
7-5 Simulationsgeometrie: Moderatorgeometrie, erzeugt aus der CAD-Zeichnung von A. Schwab [37] (auf den eingefärbten kleinen Kontaktflächen werden die Randbedingung (RB) für die Spacer aufgebracht) 95
7-6 Simulationsgeometrie: Gasleitungen mit Hüllrohr am Kühlgas-Einlass erzeugt aus der CAD-Zeichnung von A. Schwab [37] (auf den eingefärbten kleinen Kontaktflächen werden die RB für die Spacer aufgebracht) . . . 96
7-7 Kontour: Temperatur der Moderatorgeometrie (links), Spacer, Methanzuleitung (oben-oben), Methanrückleitung (oben), Heliumzuleitung (unten) und Heliumrückleitung (unten-unten) 102
7-8 Kontour: Temperatur der Moderatorgeometrie (links), Spacer (Hotspots), Heliumzuleitung (oben) und Heliumrückleitung (unten) 102
7-9 Kontour: Querschnitt Temperatur der Heliumzuleitung (links) und Heliumrückleitung (rechts) $10\,\mathrm{mm}$ vor der Moderatorgeometrie 103
7-10 Schema der UDF:Spacer Funktionalität (V1 links, V2 rechts, Spacer hat eine Tiefe von $5\,\mathrm{mm}$) 106

Tabellenverzeichnis

2.1 Klassifizierung von Neutronen verschiedener Energiespektren nach der in [10, S. 13] vorgeschlagenen Konvention für „Neutron Scattering Instrumentation at Compact Neutron Sources“ 11
2.2 Emissivität mechanisch polierter Oberflächen 18
2.3 Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Vespel SP-1, ermittelt durch Skalierung der NIST-Polyimid-(Kapton-)Kurve [29, 34] mit dem Faktor $1{,}80$ zur Anpassung an den Datenblattwert von DuPont [12] bei $313\,\mathrm{K}$. Die Methode reproduziert auch Tieftemperaturmessungen an Vespel SP-1 [35, 38] mit einer Abweichung von $< 15\,\%$. 23

3.1 Liste aller Sensoren 46

7.1 Wärmefluss durch MLI nach Lockheed-Gleichung in Abhängigkeit von der kalten Wandtemperatur T_c (10 Lagen, $\bar{N} = 10\,$Lagen/cm, $\varepsilon = 0{,}04$, $T_h = 293\,\mathrm{K}$). 92
7.2 Mesh-Qualitäts-Zielwerte für die CFD-Simulation des Kryostaten. 96
7.3 Vergleich der Mesh-Qualitätsanforderungen mit dem erreichten Volumenmesh. 98
7.4 Mesh-Qualitätswerte des finalen Volumenmeshes. 98
7.5 Erste Simulationsergebnisse des Kryostaten im Betriebspunkt $10\,\mathrm{K}$ bei einem Helium-Massenstrom von $0{,}08\,\mathrm{g/s}$ (Iteration 4020). 100
7.6 Simulationsergebnisse des Kryostaten im Betriebspunkt $10\,\mathrm{K}$ bei einem Helium-Massenstrom von $0{,}084\,\mathrm{g/s}$ (Iteration 2002). 104
7.7 Aufschlüsselung des Wärmeeintrags in konstruktiv gewollten He-Auslass-Anteil und relevanten Wärmeeintrag in den Moderator. 105

8.1 Übersicht der Arbeitsziele 110

Nomenklatur

Lateinische Symbole

$\bar{N}$ Schichtdichte [Schichten/cm]

ΔT Temperaturdifferenz [K]

$\dot{m}$ Massenstrom [kg/s]

$\dot{Q}$ Wärmestrom [W]

$\dot{q}$ Wärmestromdichte [W/m^2]

$\dot{Q}_{\text{Spacer}}$ Wärmestrom durch einen Spacer-Pfad [W]

$\dot{q}_{\text{Spacer}}$ Wärmefluss auf der Rohrkontaktfläche [W$/$m^2]

$\dot{V}$ Volumenstrom [m³/s]

$\overline{E}_0$ mittlere Neutronenenergie vor der Kollision [eV]

A Massenzahl des Moderatormaterials [$-$]

A_{eff} Effektiver Wärmeleitungs-Querschnitt des Spacers [m^2]

A_{Kontakt} Kontaktfläche zwischen Spacer und Rohr [m^2]

c_p Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [$\mathrm{J}/(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{K})$]

C_r empirische Strahlungskonstante, materialabhängig [$-$]

C_s empirische Leitungskonstante, materialabhängig [$-$]

$d_{\text{flüssig}}$ Flüssigkeitsdichte [kg/m³]

d_{gas} Gasdichte [kg/m³]

E mittlere Neutronenenergie nach der Kollision [eV]

$e(t)$ Regeldifferenz (Regelabweichung) [$-$]

$k(T)$ Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Vespel SP-1 [$\mathrm{W}/(\mathrm{m\,K})$]

K_D Differentialbeiwert des PID-Reglers [$-$]

K_I Integralbeiwert des PID-Reglers [$-$]

K_P Proportionalbeiwert des PID-Reglers [$-$]

$K_{I_{\text{lowtemp,eff}}}$ Effektiver Integralbeiwert bei tiefen Temperaturen [$-$]

$K_{P_{\text{lowtemp,eff}}}$ Effektiver Proportionalbeiwert bei tiefen Temperaturen [$-$]

L_{eff} Effektive Pfadlänge des Wärmeleitungspfads [m]

l_a mittlere freie Weglänge zwischen Absorptionsprozessen [m]

l_s mittlere freie Weglänge zwischen Streuereignissen [m]

m empirischer Exponent, materialabhängig [$-$]

m_n Neutronenmasse $= 1{,}675 \times 10^{-27}$ kg

N Anzahl der MLI-Schichten [$-$]

N Gesamtanzahl der MLI-Schichten [$-$]

n Brechzahl [$-$]

p_{abs} Absoluter Druck [bar]

p_{rel} Relativer Druck [bar]

$T_{\text{heiß}}$ Temperatur der wärmeren Fläche [K]

T_{kalt} Temperatur der kälteren Fläche [K]

T_{VA} Temperatur der Vakuumkammer-Außenwand [K]

T_{Wand} Temperatur der Rohrwand am Kontaktpunkt [K]

T_k Temperatur der kalten Seite [K]

T_w Temperatur der warmen Seite [K]

T_{Soll} Solltemperatur [K]

$u(t)$ Reglerausgang (Stellgröße) [$-$]

$U_{\text{Transferheber}}$ Steuerspannung des Transferhebers [V]

Griechische Symbole

$\hbar$ reduziertes Plancksches Wirkungsquantum $= 1{,}055 \times 10^{-34}$ J s

λ_{Neutron} de-Broglie-Wellenlänge des Neutrons [m]

σ Stefan-Boltzmann-Konstante $= 5{,}67 \times 10^{-8}$ W$/$(m^{2}K^4)

Σ_a makroskopischer Absorptionsquerschnitt [m^{-1}]

Σ_s makroskopischer Streuquerschnitt [m^{-1}]

ε Emissionsgrad [$-$]

ξ mittlerer logarithmischer Energieverlust pro Stoß [$-$]

SPS Speicherprogrammierbare Steuerung
Dewar doppelwandiger, evakuierter Behälter aus Edelstahl zur hocheffizienten thermischen Isolierung
ANSYS ANSYS Fluent Simulationssoftware
MFC Masseflussregler (Mass Flow Controller)
MLI Multi Layer Insulation
CAD Computer Aided Design
UDF User Defined Function
GMP Gasmanagementpanel
RB Randbedingung
PC Druckregler (Pressure Controller)

1 Einführung

Das Kühlen, Verflüssigen und Erstarren von wasserstoffhaltigen Stoffen spielt eine zentrale Rolle in vielen Bereichen der modernen Forschung und Industrie. Die Grundlagenforschung der Teilchenphysik, die Raumfahrt, die Erforschung von Wasserstoff als Energieträger der Zukunft und die Forschung mit Neutronen sind exemplarische Anwendungsfelder. Kryostaten sind dabei unverzichtbare Werkzeuge, um zuverlässig und reproduzierbar tiefe Temperaturen bereit zu stellen, um diese Phasenübergänge hervorzurufen.

Im Rahmen der Masterarbeit wird ein Kryostat betrachtet, der mithilfe von unter Druck gesetztem flüssigem Helium oder Stickstoff verschiedene wasserstoffhaltige Gase (gasförmig bei Raumtemperatur) wie Wasserstoff (H_2), Methan (CH_4), usw. verflüssigen, erstarren und bis auf 10 K kühlen kann. Der Kryostat wurde im Zuge der Dissertation von A. Schwab für die Neutronenforschung als Moderator für Forschungsneutronen gebaut [37]. Im Kryostaten werden flüssiger Stickstoff (N_2) oder flüssiges Helium (He), welche in einem isolierten 100 l Behälter angeliefert werden, unter Druck gesetzt und dadurch durch die Kühlleitungen und die Moderatorgeometrie gedrückt. Dort transportiert das Kühlmittel (He oder N_2) die Wärmeenergie im Moderatorgas ab und verflüssigt und erstarrt dieses. Mit dem erstarrten/verflüssigten Moderatorgas werden Neutronen für die Forschung auf ein gewünschtes Energieniveau abgebremst.

Der Kryostat wird zur Verbesserung des Benutzerbetriebs automatisiert. Dabei werden Start, Stopp und der kontinuierliche Betrieb vollständig automatisiert. In einem weiteren Schritt werden Sicherheitshinweise und eine Notfallabschaltung hinzugefügt.

Um die Prozesse im Kryostaten besser zu verstehen und den automatisierten Betrieb effizienter zu machen, wird eine CFD-Simulation eingesetzt. Mithilfe der ANSYS Fluent Simulationssoftware (ANSYS) wird das System nachgebildet und analysiert. Die damit gewonnenen Daten werden zur Optimierung der Betriebsparameter des Moderatorkryostaten verwendet.

1.1 Motivation

Der Betrieb von kryogenen Systemen wie einem Kryostaten ist mit erheblichem technischem und messtechnischem Aufwand verbunden. Darüber hinaus verursachen Kühlmittelverbrauch und die kontinuierliche Überwachung und manuelle Steuerung des Betriebs erhebliche Kosten.

Der Kryostat soll an der „High Brilliance Neutron Source“ (HBS) in Jülich zur Moderation von Neutronen verwendet werden. Mit dem Kryostaten sollen neue Moderatorgeometrien und verschiedene Moderatorgase getestet werden. Da der Kryostat neben der Neutronenquelle im Strahlenbereich stehen soll, muss die Aufenthaltszeit des Personals im Strahlenbereich gering gehalten werden. Während der Experimente darf sich das Personal nicht im Strahlenbereich aufhalten. Deshalb sind die Verlässlichkeit des Systems und die zuverlässige Steuerung über das interne Computer-Netzwerk wichtige Motivationen für die Automatisierung.

Um die Nutzung des Moderatorkryostaten durch Gastforscher zu erleichtern, soll möglichst wenig Einweisung für den sicheren Betrieb nötig sein. Zudem soll die Zeit, die der Gastforscher für den Betrieb des Kryostaten aufwenden muss, erheblich reduziert werden.

In weiteren Schritten soll der Betrieb des Moderatorkryostaten hinsichtlich Abkühlzeit, Kühleffizienz und erforderliche Bediendauer optimiert werden. Darüber hinaus sollen die Messtechnik sowie Messdaten besser verstanden werden, um Erkenntnisse aus der Entwicklung des Kryostaten zu gewinnen. Zu diesem Zweck werden die internen Prozesse mithilfe einer CFD-Simulation analysiert und die Betriebsparameter optimiert.

1.1.1 Neutronen

[1] Neutronen existieren in jeglicher Materie gebunden als Bausteine der Atomkerne (Nukleonen). Für Forschungszwecke werden freie Neutronen benötigt. Freie Neutronen entstehen durch Kernreaktionen, wie z.B. Kernspaltung. Ein freies Neutron ist instabil und hat eine Halbwertszeit von ca. 15 min [5]. Die durch natürliche Kernreaktionen entstehenden freien Neutronen treten in zu geringer Menge auf, als dass damit Experimente gemacht werden könnten. Daher müssen viele Kernreaktionen in kurzer Zeit ausgelöst werden, um größere Mengen freier Neutronen für die Experimente zu gewinnen. Eine mögliche Quelle, die viele freie Neutronen freisetzt, ist eine Kernreaktion.

[1] Dieser Abschnitt wurde teilweise aus der Bachelorarbeit des Autors [33] übernommen und angepasst.

1.1.2 Wozu Neutronen?

[2] Neutronen werden für viele Forschungstätigkeiten benötigt. Dazu gehören:

- zerstörungsfreie Materialprüfungsmethoden wie Neutronenradiographie und -tomographie
- sichtbar machen von Wasserstoff in biologischen Prozessen/Molekülen
- Forschung in den Bereichen neue Materialien, z.B. Auffinden von Supraleitern, und Ursprung des Universums
- Erforschung magnetischer Eigenschaften auf atomarer Ebene
- zerstörungsfreier Nachweis von Spurenelementen
- Produktion von Radionukliden für Medizin und Forschung
- Prozesse verstehen, wie z.B. die Dynamik und Diffusion von Molekülen in Materialien mittels Neutronenstreuung

[9]

Neutronen- und Röntgenstrahlung werden beide zur Bildgebung benutzt, beruhen aber auf grundlegend verschiedenen Wechselwirkungen. Während die Röntgenschwächung an der Elektronenhülle erfolgt und systematisch mit der Ordnungszahl ansteigt, wechselwirken Neutronen mit dem Atomkern. Der Neutronen-Wechselwirkungsquerschnitt variiert daher unregelmäßig über das Periodensystem – und sogar zwischen Isotopen desselben Elements – und steigt gerade nicht systematisch mit der Massen- oder Ordnungszahl an [**?**]. Insbesondere weisen viele leichte Elemente wie Wasserstoff einen großen Streuquerschnitt auf, sodass sie sich mit Neutronenstrahlung auch neben schwereren Elementen kontrastreich abbilden lassen.

1.1.3 Neutronenquellensterben

[3] In Europa und Deutschland hat sich in den letzten drei Jahrzehnten die Lage für die Neutronenforschung gewandelt. Die Forschungsreaktoren, welche freie Neutronen zu

[2] Dieser Abschnitt wurde teilweise aus der Bachelorarbeit des Autors [33] übernommen und angepasst.
[3] Dieser Abschnitt wurde teilweise aus der Bachelorarbeit des Autors [33] übernommen und angepasst.

Forschungszwecken erzeugen, wurden weniger. In den letzten drei Jahrzehnten wurden die Forschungsreaktoren in Jülich, Geesthacht und Berlin stillgelegt [1]. In Deutschland bleiben noch die Forschungsreaktoren in Garching und Mainz. Dadurch ist ein Mangel an Forschungsneutronen entstanden.

1.1.4 HBS-Projekt

Das HBS-Projekt hat das Ziel, einen Teil des entstandenen Mangels an Neutronenquellen auszugleichen. Dafür ist der Bau einer beschleunigerbasierten Neutronenquelle in Jülich vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) auf die Prioritätsliste zukünftiger deutscher Forschungsinfrastruktur gesetzt worden. Es ist geplant einen Protonen-Beschleuniger mit niedriger Protonenenergie und hohem Protonenstrom einzusetzen, um Neutronen an einen Metalltarget freizusetzen. Die nationale Forschungsneutronenquelle soll die „European Spallation Source“ (ESS) als führende europäische Neutronenquelle ergänzen. [8]

1.1.5 Beschleunigerbasierte Neutronenquellen

[4] Beschleunigerbasierte Neutronenquellen basieren auf Teilchenbeschleunigern und den Interaktionen der beschleunigten Teilchen mit anderer Materie.

Arten von beschleunigerbasierten Neutronenquellen

[5] Es gibt zwei Arten von beschleunigerbasierten Neutronenquellen:

Die spallationsbasierte Neutronenquelle ($0{,}5$ bis 2 GeV):

Protonen werden durch einen Teilchenbeschleuniger auf hohe Energie gebracht. Das Proton überwindet die abstoßenden Kernkräfte. Danach ist die Energie des Protons verglichen mit den Bindungskräften zwischen den Nukleonen hoch genug, sodass es zum Stoßprozess zwischen Proton und einem einzelnen Nukleon kommt. Dabei wird Energie übertragen und das Nukleon kann weitere Stoßprozesse mit anderen Nukleonen auslösen. So verteilt sich die Energie im ganzen Kern. Um diese Energie schnell

[4] Dieser Abschnitt wurde teilweise aus der Bachelorarbeit des Autors [33] übernommen und angepasst.
[5] Dieser Abschnitt wurde teilweise aus der Bachelorarbeit des Autors [33] übernommen und angepasst.

wieder abzugeben, werden Neutronen aus dem Kern gestoßen (Neutronenabdampfung). Dabei sind pro Neutron etwa $8\,\mathrm{MeV}$ aufzubringen. [5]

Die „Low-energy proton accelerator"-Neutronenquelle:

Freie Neutronen werden erzeugt, indem Protonen oder Deuteronen mit Energien von etwa $2\,\mathrm{MeV}$ bis $100\,\mathrm{MeV}$ auf ein Targetmaterial – typisch Lithium, Beryllium oder Tantal – beschleunigt werden. Die Neutronenfreisetzung erfolgt dabei über verschiedene Kernreaktionen.

Bei **Protonen** dominieren je nach Energie unterschiedliche Mechanismen der (p, n)-Reaktion:

- **Compoundkernreaktion** ($E_p \sim 2\,\mathrm{MeV}$ bis $5\,\mathrm{MeV}$): Das Proton verschmilzt mit dem Targetkern zu einem kurzlebigen angeregten Zwischenkern, der statistisch ein Neutron emittiert. Die Emission ist nahezu isotrop; der Großteil der Strahlenergie ($\sim 94\,\%$) wird im Target als Wärme deponiert.
- **Prä-Equilibrium-Emission** ($E_p \sim 5\,\mathrm{MeV}$ bis $20\,\mathrm{MeV}$): Das Proton überträgt Energie auf einzelne Nukleonen, bevor ein thermisches Gleichgewicht im Kern entsteht. Das Neutron wird bevorzugt vorwärtsgerichtet emittiert.
- **Direkter Knockout – (p, pn)-Reaktion** ($E_p \gtrsim 20\,\mathrm{MeV}$): Das Proton überträgt durch einen quasi-elastischen Stoß direkt Impuls auf ein durch die Fermi-Bewegung quasi-freies Neutron im Kern. Das Neutron wird stark vorwärtsgerichtet emittiert und trägt einen größeren Anteil der Protonenenergie mit.

Bei **Deuteronen** tritt vorwiegend die **Stripping-Reaktion** (d, n) auf: Das Deuteron – ein gebundenes Proton-Neutron-Paar mit einer Bindungsenergie von $2{,}22\,\mathrm{MeV}$ – streift den Targetkern, wobei das Proton vom Kern aufgenommen wird und das Neutron als freies Neutron weiterfliegt. Bei höheren Deuteronenenergien kann auch ein Breakup-Prozess auftreten, bei dem das Neutron nicht gebunden wird und mit etwa der halben Deuteronenenergie vorwärts emittiert wird. Die dabei freigesetzten **Protonen** im MeV-Energiebereich können die oben genannten Reaktionen hervorrufen. Die so erzeugten freien Neutronen besitzen Energien im MeV-Bereich und müssen für typische Anwendungen (s. 1.1.2) moderiert werden, um die gewünschten Energien im meV oder eV-Bereich zu bekommen. [8, 21, 16]

Für das HBS-Projekt ist der Einsatz von einem „low-energy proton accelerator" und einem wassergekühltem Target (s. Abb. **1**-3) als Neutronenquelle geplant. In einem Testaufbau, der JULIC Neutron Platform, wurde der Prototypen der Targetstation bereits in dieser Konfiguration getestet [39]. In den Abbildungen **1**-1, **1**-2 und **1**-3 ist der Prototyp

der Targetstation zu sehen. Eine ähnliche Targetstation wird voraussichtlich im HBS-Projekt aufgebaut werden.

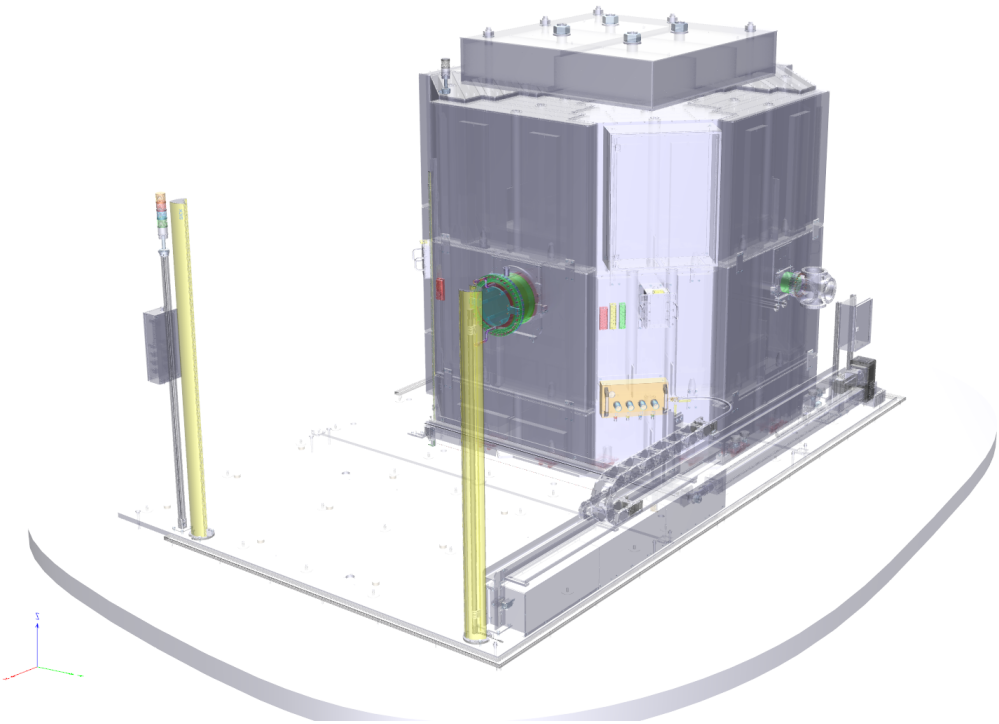


Abbildung **1**-1: CAD: Target Station

Die Targetstation kann mit der Vorrichtung (s. Abb. **1**-1 u. **1**-2) geöffnet werden. Das vordere Drittel der Targetstation wird dabei mit einem elektischen Antrieb versetzt. Das erlaubt die Modifizierung des Inneren der Targetstation für die Anforderungen verschiedener Experimente.

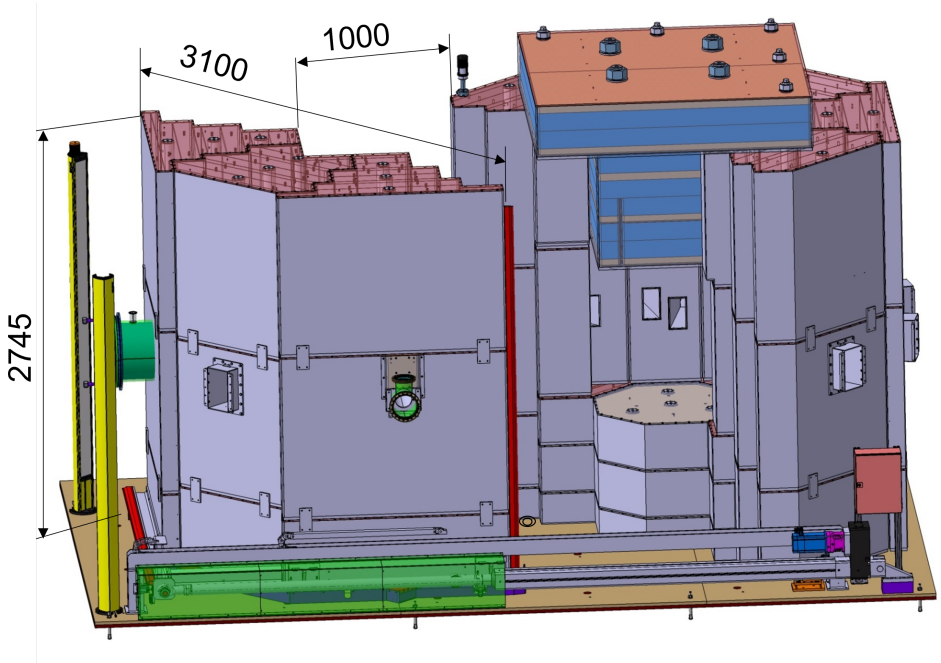


Abbildung **1**-2: CAD: offene Target Station

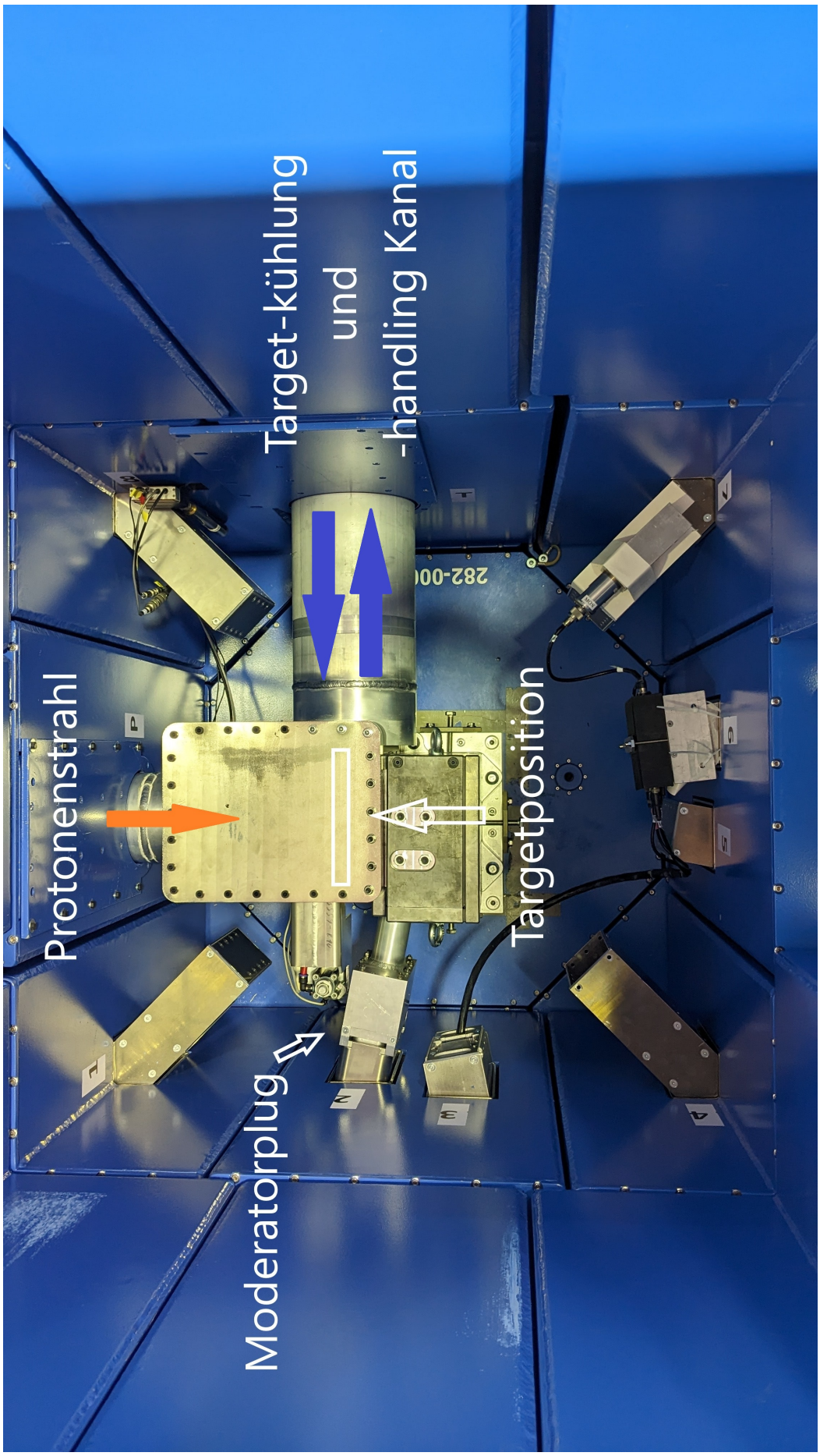


Abbildung **1**-3: Target Station von oben

1.1.6 Neutronenmoderation

[6] Neutronen, die bei den zuvor beschriebenen Kernprozessen freigesetzt werden, besitzen zunächst eine hohe kinetische Energie im MeV Bereich. Dieses Energieniveau ist für viele Anwendungen in der Neutronenphysik nicht praktikabel und ein niedrigeres Energieniveau (z.B ~ 25 meV entsprechen Raumtemperatur) wird benötigt. Der Prozess, bei dem die schnellen Neutronen auf ein niedrigeres Energieniveau abgebremst werden, nennt man Moderation. Zu diesem Zweck werden unter anderem H_2O, H_2, D_2 und andere wasserstoffhaltige Verbindungen wie Methan, Ethan usw. eingesetzt, da Neutronen beim Durchdringen von Wasserstoff oder wasserstoffhaltigen Verbindungen eine hohe Wahrscheinlichkeit haben, Energie an diese abzugeben (hoher Wirkungsquerschnitt).

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der Masterarbeit ist die Automatisierung des „Kryostat für einen kompakten kryogenen Neutronenmoderator“, welcher im Zuge der Doktorarbeit von Alexander Schwab für das HBS-Projekt entworfen und gebaut wurde.

Hierbei wird besonderer Wert auf einen einfachen und sicheren Betrieb des Kryostaten gelegt. Mithilfe von Simulationen soll das Verhalten des Kryostaten verstanden und verbessert werden. Die Arbeit dient zusätzlich zur Dokumentation der Automatisierung. Daraus leiten sich folgende Ziele ab:

- **Automatisierung des Kryostaten**
  - Starten des Kryostaten aus dem warmen Zustand mit einem Befehl
    - Einstellbar für mehrere Moderatorgase
    - Auswahl zwischen flüssigem Helium und flüssigem Stickstoff als Kühlmittel
    - Regelung für 10K Methan auslegen
    - Sicherheitsabschaltung bei Fehlfunktion
    - Bei Grenzwertüberschreitung Warnung an den Benutzer ausgeben, um einfachen Betrieb zu gewährleisten

[6] Dieser Abschnitt wurde teilweise aus der Bachelorarbeit des Autors [33] übernommen und angepasst.

        * Optimierung des Vorgangs durch gezielte Anpassung der Betriebsparameter

    - Ausschalten des Kryostaten mit einem Klick

        * Einstellbar für mehrere Moderatorgase

        * Auswahl zwischen flüssigem Helium und flüssigem Stickstoff als Kühlmittel

- Verstendnis des Prozesses mithilfe von Simulationsdaten

    - Simulation der Verschiebung des Phasenüberganges

    - Verhalten des Moderatorgases bei der Erstarrung

    - Optimierung des Heliumverbrauchs beim Startvorgang

    - Möglichen Idle-Betrieb simulieren

    - Verhaltensphasen simulieren

    - Übertragbarkeit auf andere Moderatorgase

    - Übertragungskennwerte (im Sinne der Regelungstechnik) ermitteln

- **Erprobung des Kryostaten**

    - Erprobung der Automatisierung

    - Vergleich zwischen Simulationsdaten und realem Verhalten

    - Erprobung der Übertragbarkeit zwischen Kühl- und Moderatorgasen

2 Grundlagen

Dieses Kapitel wurde teilweise aus der Bachelorarbeit des Autors [33] übernommen und angepasst.

Das Kapitel behandelt die Grundlagen der Neutronenerzeugung, Neutronenmoderation und Neutronenleitung. Zudem werden die Grundlagen der inneren Wärmeleitung des Kryostaten und der verwendeten Materialien betrachtet.

2.1 Neutronen

Ein Neutron hat die Masse $m_n = 1,67 \times 10^{-24}$ g, ein magnetisches Moment von $\mu_n = -9,66 \times 10^{-27}$ J/T und einen Spin von $1/2$ (Fermion). Freie Neutronen haben eine Halbwertszeit von ≈ 15 min. Die Neutronen zerfallen spontan in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino.

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \overline{\nu}_e + 0,78\,\text{MeV} \tag{2.1}$$

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über Eigenschaften und Bezeichnungen verschiedener Neutronenklassen. Da in der Literatur kein einheitlicher Konsens über die Energiegrenzen besteht, folgt die Einteilung der der vorgeschlagenen Konvention nach [10, S. 13].

Kategorie	**Energiebereich**	**Wellenlänge**
Fast (unusable)	$E > 10\,\text{keV}$	—
Resonance neutrons	$2\,\text{eV} < E < 10\,\text{keV}$	—
Epithermal neutrons	$500\,\text{meV} < E < 2\,\text{eV}$	—
Thermal	$10\,\text{meV} < E < 500\,\text{meV}$	$0,41$ Å bis $2,9$ Å
Cold	$1\,\text{meV} < E < 10\,\text{meV}$	$2,9$ Å bis $9,2$ Å
Very cold	$E < 1\,\text{meV}$	$> 9,2$ Å

Tabelle 2.1: Klassifizierung von Neutronen verschiedener Energiespektren nach der in [10, S. 13] vorgeschlagenen Konvention für „Neutron Scattering Instrumentation at Compact Neutron Sources“

2.2 Thermische Neutronenmoderation

Freie Neutronen haben bei der Freisetzung aus einer Kernreaktion typischerweise Energien im MeV-Bereich. Um daraus thermische Neutronen zu erzeugen, werden die Neutronen in einem thermischen Moderator auf ein Maxwell-Boltzmann-verteiltes Energiespektrum abgebremst. Als Referenzwert dient die wahrscheinlichste Geschwindigkeit dieser Verteilung, die bei $293{,}6\,\mathrm{K}$ etwa $2{,}2\,\mathrm{km/s}$ beträgt und einer kinetischen Energie von $25{,}3\,\mathrm{meV}$ ($0{,}0253\,\mathrm{eV}$) entspricht [4]. Die mittlere kinetische Energie dieser Verteilung liegt mit $\frac{3}{2}k_BT \approx 38\,\mathrm{meV}$ höher, das Maximum der Energieverteilung dagegen bei $\frac{1}{2}k_BT \approx 13\,\mathrm{meV}$; der angegebene Referenzwert bezieht sich auf die wahrscheinlichste Geschwindigkeit ($k_BT \approx 25{,}3\,\mathrm{meV}$). Zu diesem Zweck wird im HBS-Projekt Wasser als thermischer Moderator verwendet [8].

2.3 Kalte Neutronenmoderation

Um kalte Neutronen zu erzeugen, müssen thermische Neutronen von einem kalten Moderator bis auf eine Energie unter $0,010\,\mathrm{eV}$ ($\sim 116\,\mathrm{K}$) oder Geschwindigkeit unter $1,4\,\mathrm{km/s}$ [4] abgebremst werden.

Kalte Neutronenmoderation verringert die Energie der freien Neutronen auf ein Spektrum unterhalb des thermischen Bereichs $0{,}010\,\mathrm{eV}$ [4]. Der Neutronenmoderationsprozess wird durch die Materialeigenschaften bestimmt, welche den Stoßprozess zwischen Neutron und Atomkern des Moderatormaterials charakterisieren.[1] Die Materialeigenschaften sind die mittlere freie Weglänge zwischen Streuereignissen (l_s), die mittlere freie Weglänge zwischen Absorptionsprozessen (l_a) und die durchschnittlich abgegebene Energiemenge des Neutrons an das Moderatormaterial (ξ).

$$\xi = \ln \frac{\overline{E}_0}{E} = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \times \ln(\frac{A-1}{A+1})[17]^2 \tag{2.2}$$

Aus der Gleichung 2.2 folgt, dass ein ideales Moderatormaterial die kleinstmögliche Massenzahl besitzt. Zudem sollte das Material den kleinstmöglichen Neutronenabsorptionsquerschnitt ($\Sigma_a = \frac{1}{l_a}$) und den größtmöglichen Neutronenstreuquerschnitt ($\Sigma_s = \frac{1}{l_s}$) besitzen.

[1] Eigene Übersetzung. Original: „The neutron moderation process is determined by the values related to the elementary act of collision of the neutron with the nucleus of the moderator material.“ [17, Seite 4]

[2] ξ: mittlerer logarithmischer Energieverlust pro Stoß, $\overline{E}_0$: mittlere Neutronenenergie vor der Kollision, E: mittlere Neutronenenergie nach der Kollision, A: Massenzahl des Moderatormaterials

Aus $\frac{\xi}{l_s}$ ergibt sich der Kennwert der Moderationseffizienz[3]. Dieser Wert beschreibt die durchschnittliche Energieabgabe pro Weglänge vom Neutron. Aus $\frac{\Sigma_s}{\Sigma_a}$ ergibt sich der Kennwert des Moderationsverhältnisses. Dieser Wert beschreibt die durchschnittliche Anzahl von Stoßprozessen vor einem Absorptionsprozess. Ein Moderatormaterial ist umso geeigneter, je höher seine Moderationseffizienz und sein Moderationsverhältnis sind. [17]

Bei niedrigeren Neutronenenergien hängen die Streuquerschnitte nicht mehr hauptsächlich von den Atomkernen des Moderatormaterials ab, sondern auch von molekularen Eigenschaften wie z.B. Bindungsenergie und magnetischem Moment. Darüber hinaus ist die
de-Broglie-Wellenlänge bei niedrigen Neutronenenergien vergleichbar mit atomaren Abständen, weshalb Neutronen dann empfindlich für Materialstrukturen (Neutronenbeugung, Kleinwinkelstreuung) und molekulare Dynamik (inelastische Neutronenstreuung) werden.[17]

Da Neutronen bei der Moderation gestreut und damit räumlich verteilt werden, muss die Moderation in einem kleinen Volumen nah an der Neutronenquelle und am Neutronenleiter stattfinden, um die Extraktion moderierter Neutronen zu maximieren. Folglich ist die Moderationseffizienz des Moderatormaterials in diesem Anwendungsfall relevanter als das Moderationsverhältnis. [6]

Wasserstoffatome sind aufgrund von Massenzahl und Streuquerschnitt besonders für die Moderation von Neutronen geeignet. Mit einer Massenzahl von $A = 1$ erreicht Wasserstoff den maximal möglichen mittleren logarithmischen Energieverlust pro Stoß $\xi = 1$. Zudem besitzt Wasserstoff einen hohen Neutronenstreuquerschnitt, was zu einer hohen Moderationseffizienz $\xi \cdot \Sigma_s$ führt. Ein Nachteil von Wasserstoff ist sein im Vergleich zu anderen Atomen (D, C, O, Be,...) um mehrere Größenordnungen erhöhter Neutronenabsorptionsquerschnitt. Daraus folgt ein verringertes Moderationsverhältnis $\frac{\Sigma_s}{\Sigma_a}$. [17]

2.3.1 Moderatoren

Für die kalte Moderation wird z.B. Wasserstoff in flüssiger oder fester Form eingesetzt. Durch die höhere Dichte (an Wasserstoffatomen) in flüssiger oder fester Phase wird die Stoßwahrscheinlichkeit und damit die Moderationseffizienz erhöht. Alternativ werden wasserstoffhaltige Verbindungen wie Methan (CH_4) oder Ethan (C_2H_6) eingesetzt.

[3] Die Moderationseffizienz ist definiert als $\xi \times \Sigma_s$. $\xi \times \Sigma_s = \frac{\xi}{l_s}$

Kohlenwasserstoffe sind, im Vergleich zu H_2, durch eine höhere Erstarrungstemperatur (s. 2.4) und andere Stoffeigenschaften, wie die niedrigere Permeationsrate, einfacher zu handhaben. Kohlenwasserstoffe liegen bei Temperaturen, bei denen Wasserstoff noch gasförmig ist, bereits in flüssiger oder fester Phase vor und besitzen daher in diesem Temperaturbereich eine höhere Wasserstoffdichte. Durch den höheren Anteil an schwereren Atomen wie Kohlenstoff ist die Wasserstoffdichte und damit die Moderationseffizienz jedoch geringer als bei flüssigem oder festem Wasserstoff. [17]

2.3.2 Neutronenleiter

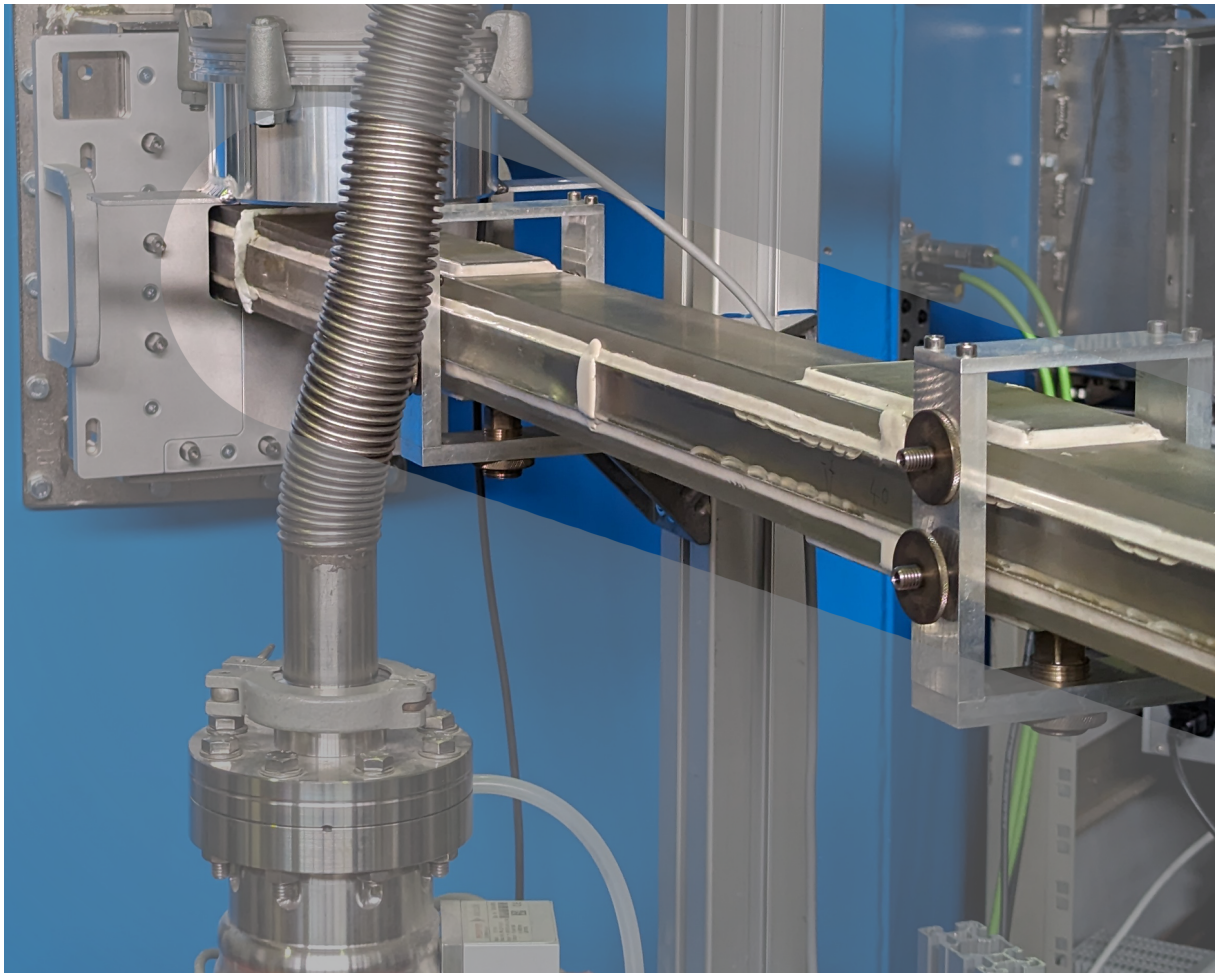


Abbildung **2**-1: ^{58}Ni-Neutronenleiter des para-Wasserstoff-Kryostaten[33]

Die Aufgabe von Neutronenleitern ist es, die Neutronen über eine längere Strecke zu den Experimenten zu leiten. Neutronenleiter basieren auf dem Prinzip der Totalreflexion. Das Neutron kann auch als Materialwelle mit einer Wellenlänge $\lambda_{\text{Neutron}} = \frac{\hbar}{p}$ beschrieben werden. Daher werden die Neutronen an Grenzflächen gebrochen. Der Effekt der Totalreflexion tritt winkelabhängig auf. Im Gegensatz zum Verhalten von Lichtwellen

verringert sich die Brechzahl von Neutronen in der Materie. Der Neutronenleiter schließt ein Vakuum ein, in dem sich die Neutronen bewegen. Das Vakuuminnere des Leiters besitzt mit $n = 1$ die höchste Brechzahl. Für kalte Neutronen eignet sich das Nickel-Isotop ^{58}Nickel als Material [2]. Daher werden von innen mit ^{58}Nickel bedampfte Glasrohre mit rechteckigem Querschnitt als Neutronenleiter verwendet. Die Glasrohre werden mit Silikon luftdicht versiegelt und evakuiert (s. Abb. **2**-1).

2.4 Stoffgrundlagen

2.4.1 Helium

Helium hat unter Normaldruck eine Verdampfungstemperatur von $4{,}2238$ K. Der kritische Druck beträgt $2{,}2832$ bar und die kritische Temperatur beträgt $5{,}1953$ K. [30]. In der Simulation wird mit dem Tool REFPROP die Datenbank aus NIST übernommen.

2.4.2 Stickstoff

Stickstoff hat unter Normaldruck eine Verdampfungstemperatur von $77{,}355$ K. Bei $63{,}151$ K gefriert Stickstoff. Der kritische Druck beträgt $33{,}958$ bar und die kritische Temperatur beträgt $126{,}192$ K. [30].

2.4.3 Methan

Methan ist ein Gefahrstoff, der bei Austritt und Vermischung mit der Raumluft leicht entflammbar ist und explosiv werden kann. Daher müssen Sicherheitsvorkehrungen getroffen und Unterweisungen gelesen werden, um Unfällen bei der Verwendung im Kryostaten vorzubeugen. [27] Methan hat unter Normaldruck eine Verdampfungstemperatur von $111{,}667$ K. Bei $90{,}694$ K gefriert Methan. Der kritische Druck beträgt $45{,}992$ bar und die kritische Temperatur beträgt $190{,}564$ K. [30].

2.4.4 Wasserstoff

Wasserstoff ist ein Gefahrstoff, der bei Austritt und Vermischung mit der Raumluft leicht entflammbar ist und explosiv werden kann. Daher müssen Sicherheitsvorkehrungen getroffen und Unterweisungen gelesen werden, um Unfällen bei der Verwendung im Kryostaten vorzubeugen. [28] Wasserstoff hat unter Normaldruck eine Verdampfungstemperatur von $20{,}369$ K. Bei $13{,}957$ K gefriert Wasserstoff. Der kritische Druck beträgt $12{,}964$ bar und die kritische Temperatur beträgt $33{,}145$ K. [30].

2.5 Wärmeübertragung in kryogenen Systemen

In kryogenen Systemen ist die Minimierung des Wärmeeintrags von zentraler Bedeutung, da die eingetragene Wärmeenergie durch das Kühlmittel abtransportiert werden muss und damit den Verbrauch an Kühlmittel direkt erhöht. Energie, die durch Wärmeleitung oder Wärmestrahlung in das kryogene System eingebracht wird, wird vom Kühlmittel aufgenommen und abtransportiert, wobei sich dieses erwärmt. Je tiefer die Solltemperatur ist, desto wichtiger ist die Minimierung des Wärmeeintrags, da die Wärmeleitung proportional zur Temperaturdifferenz zunimmt. Der Strahlungswärmeeintrag nähert sich mit sinkender Systemtemperatur dem Maximalwert $\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{heiß}}^4$, wobei die temperaturabhängige Emissivität $\varepsilon(T)$ von Metallen wie Aluminium und Edelstahl mit sinkender Temperatur abnimmt und den Strahlungswärmeeintrag zusätzlich reduziert. [15]

Im System befindet sich bei einem Start aus dem warmen Zustand Wärmeenergie, welche in den Materialien und dem Moderatorgas gespeichert ist. Ist diese Wärmeenergie durch das Kühlmittel abtransportiert worden, bildet sich ein Gleichgewicht zwischen Wärmeeintrag und Kühlleistung. Die sich einstellende Temperatur entspricht dem Betriebspunkt des Systems. Das Ziel der Regelung ist es, diesen Betriebspunkt auf die Solltemperatur einzustellen.

2.5.1 Wärmestrahlung

Der durch Wärmestrahlung übertragene Wärmestrom kann mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz mathematisch dargestellt werden:

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{heiß}}^4 - T_{\text{kalt}}^4) \tag{2.3}$$

Aus der Formel geht hervor, dass die Wärmestromdichte maßgeblich von der Emissivität und der Temperaturdifferenz des kryogenen Systems zur Vakuumaußenhülle abhängt. $T_{\text{heiß}}$ beschreibt die Temperatur der Vakuumaußenhülle $(293\,\text{K})$. Da das Ziel eines Kryostaten eine niedrige innere Temperatur ist, wird der durch Wärmestrahlung übertragene Wärmestrom über die Minimierung der Emissivität reduziert. [32]

Emissivität von Aluminium, Edelstahl und Invar

Die Emissivität von Metallen ist stark oberflächen- und temperaturabhängig. In der Dissertation von Alexander Schwab zum Design des Kryostaten stehen keine genauen Angaben über die Oberflächenbeschaffenheit. In der Dissertation wird Aluminium konservativ mit einer Emissivität $\varepsilon = 0,2$ angenommen, um den Moderatorkryostaten zur Validierung zu simulieren. [37] Dies entspricht der Emissivität von gefrästem Aluminium bei Raumtemperatur.

Publizierte Messdaten für den Temperaturbereich $4\,\text{K}$ bis $300\,\text{K}$ sind nur begrenzt verfügbar. Daher werden abgeleitete Daten für Aluminium 5083-O und Invar-36 verwendet. Die hier verwendeten Emissivitätswerte stammen aus Messungen am Institute of Scientific Instruments (ISI) in Brno, deren Apparatur und Messmethode in [20] beschrieben sind. Die spezifischen Werte für mechanisch polierte Aluminiumlegierungen sind [26] entnommen, die Werte für Edelstahl 304 der erweiterten Datenbank [14]. Werte für Invar 36 sind aus Edelstahl-304-Daten [14] als Proxy abgeleitet, da keine direkten Messdaten unter $300\,\text{K}$ vorliegen (s. 2.2). Der Wert von Invar 36 bei Raumtemperatur ist bekannt und der Offset zwischen diesem Wert und dem von Edelstahl-304 wurde auf die Werte von Edelstahl-304 addiert. Werte für Al 5083-O basieren auf Messungen vergleichbarer 99,5% Al-Legierungen [26] (s. 2.2).

Angenommene Unsicherheit: Die in 2.2 angegebenen Werte besitzen eine apparaturbedingte Messunsicherheit von ca. $\pm 7\,\%$ $(T > 60\,\text{K})$ bis $\pm 11\,\%$ $(T \approx 30\,\text{K})$ nach [20]. Hinzu kommt eine erheblich größere Unsicherheit aus der Übertragbarkeit auf das reale Bauteil aufgrund unterschiedlicher Oberflächenbearbeitung, Oxidation und Verunreinigungen. Die Streuung publizierter Werte für nominell gleiche Materialien beträgt typisch $\pm 20\,\%$ bis $50\,\%$ [26, 19]. Für die Sensitivitätsanalyse wird daher ein Variationsbereich von $\pm 30\,\%$ angenommen.

Tabelle 2.2: Gesamtemissionsgrad ε mechanisch polierter Oberflächen bei kryogenen Temperaturen.

T [K]	Al 5083-O	304 SS	Invar 36
20	0,020	0,045	0,050
50	0,025	0,060	0,065
77	0,030	0,075	0,080
100	0,035	0,090	0,095
150	0,045	0,110	0,115
200	0,055	0,130	0,135
250	0,065	0,145	0,150
300	0,075	0,160	0,165

Multi Layer Insulation

Multi Layer Insulation (MLI) wird im Vakuum eingesetzt, um kryogene Systeme gegen die Wärmestrahlung der Vakuumaußenhülle zu isolieren.[13] Die MLI besteht aus mehreren dünnen Schichten. Typischerweise besteht eine Lage der MLI aus einer dünnen Trägerschicht aus Kunststoff, wie z. B. Mylar, Kapton oder anderen Kunststoff-Gewebe-Kombinationen. Diese ist undurchsichtig für Wärmestrahlung und wird von beiden Seiten mit Metallen wie Aluminium oder Silber bedampft. In der Regel werden zwischen 10 und 80 Schichten zusammengefasst.[13] Dabei sollen die Schichten möglichst nah beieinander liegen, ohne sich zu berühren, da Kontakt zwischen den Schichten die Wärmeleitung erhöht. Um den Kontakt der Schichten zu verhindern, werden Gewebeabstandshalter zwischen den Isolationsschichten eingesetzt. Die äußeren Schichten sind oft zur Stabilisierung glasfaserverstärkt.

Der effektive Wärmewiderstand der MLI skaliert im Idealfall mit $\frac{1}{N+1}$, wobei N die Anzahl der Schichten ist – je mehr Schichten, desto geringer die Wärmestromdichte.[13]

Mit der Modified Lockheed Equation kann die Wärmeleitung durch die MLI approximiert werden.

$$\dot{q}_{\text{MLI}} = \frac{C_s \cdot \bar{N}^m}{N}(T_w - T_k) + \frac{C_r \cdot \varepsilon}{N} \cdot \sigma(T_w^{4,67} - T_k^{4,67})[18, \text{Seite 4-68}] \tag{2.4}$$

Konstanten für die aluminiumbedampfte Mylar-Trägerschicht:

- $\varepsilon = 0{,}04$ ($0{,}031 - 0{,}05$ typischer Bereich für aluminiumbedampftes Mylar)
- $C_s = 8{,}75 \times 10^{-8}$ W/(m×K)

- $C_r = 5{,}93 \times 10^{-10}$
- $m = 2{,}63$
- $\bar{N} = 10\,$/cm (validierter Bereich: $\bar{N} = 8 - 24\,$/cm)
- $N = 10$ [37, Seite 42-50]

2.5.2 Wärmeleitung

Wärmeleitfähigkeit von Aluminium und Edelstahl bei kryogenen Temperaturen

Die Wärmeleitung und die Wärmekapazität von Edelstahl und Aluminium sind stark temperaturabhängig und ändern sich über den Temperaturbereich des Kryostaten um mehrere Größenordnungen (s. Abb. **2**-2, **2**-3, **2**-4, **2**-5 und **2**-6). Oberhalb von $300\,$K liegen in den kryotechnischen Datenbanken keine Daten vor. Die Stoffdefinitionen wurden dort mit dem jeweiligen Wert für $300\,$K bis auf $350\,$K erweitert, um das Abstürzen während der ersten Iterationen[4] der Simulation zu verhindern.

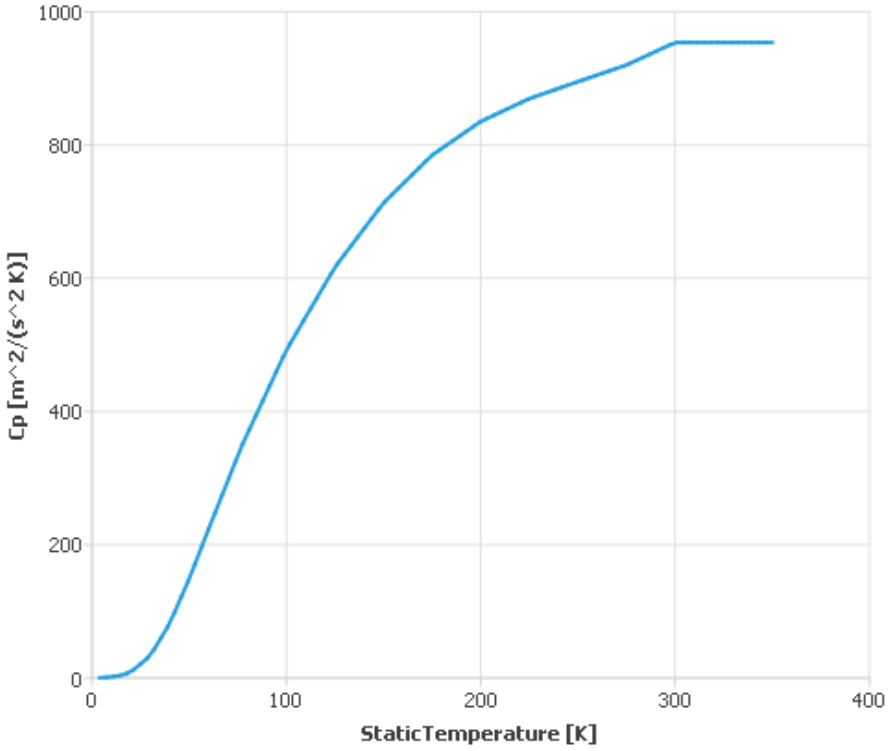


Abbildung **2**-2: In der Simulation verwendete Stoffdaten: Wärmekapazität Aluminium 5083-O

[4] Das Modell initialisiert sich meistens mit $300\,$K. Durch Wärmeströme in das System können in den ersten Iterationen kurzzeitig Werte oberhalb von 300K entstehen.

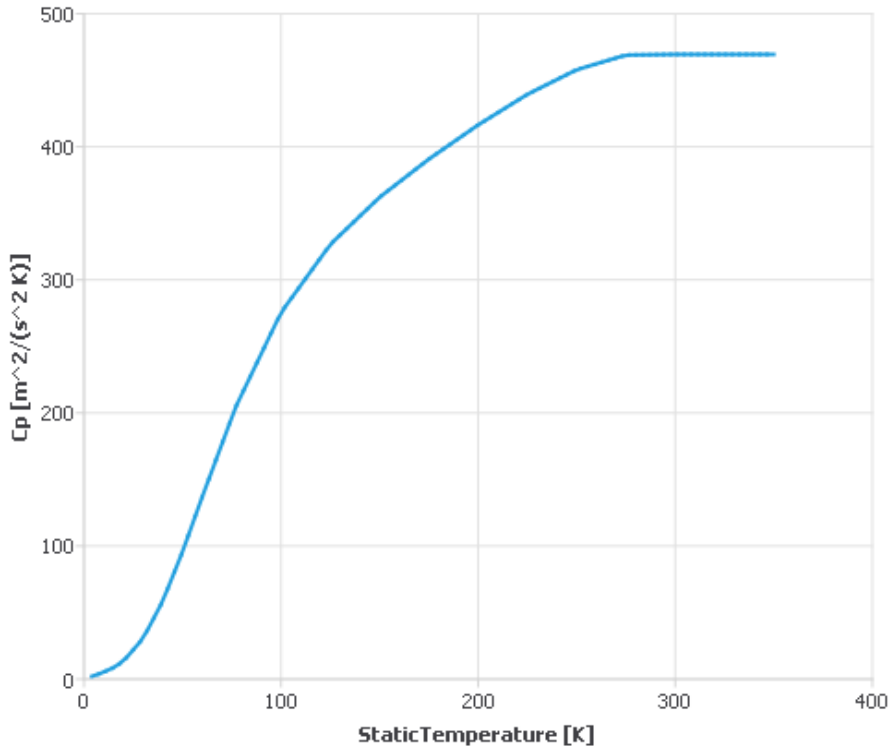


Abbildung **2**-3: In der Simulation verwendete Stoffdaten: Wärmekapazität Edelstahl 304

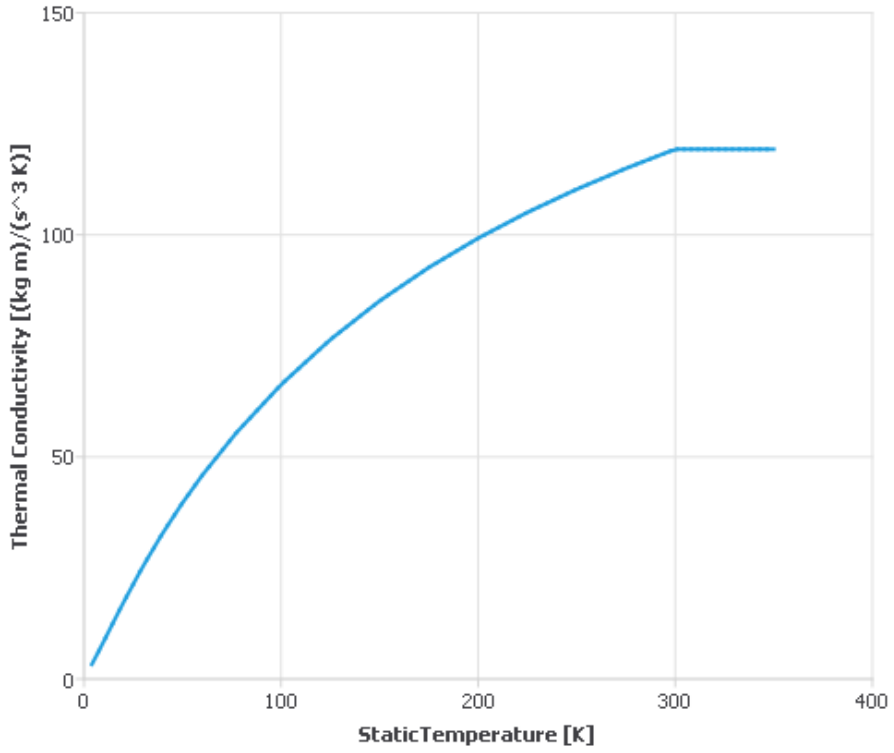


Abbildung **2**-4: In der Simulation verwendete Stoffdaten: Wärmeleitfähigkeit Aluminium 5083-O

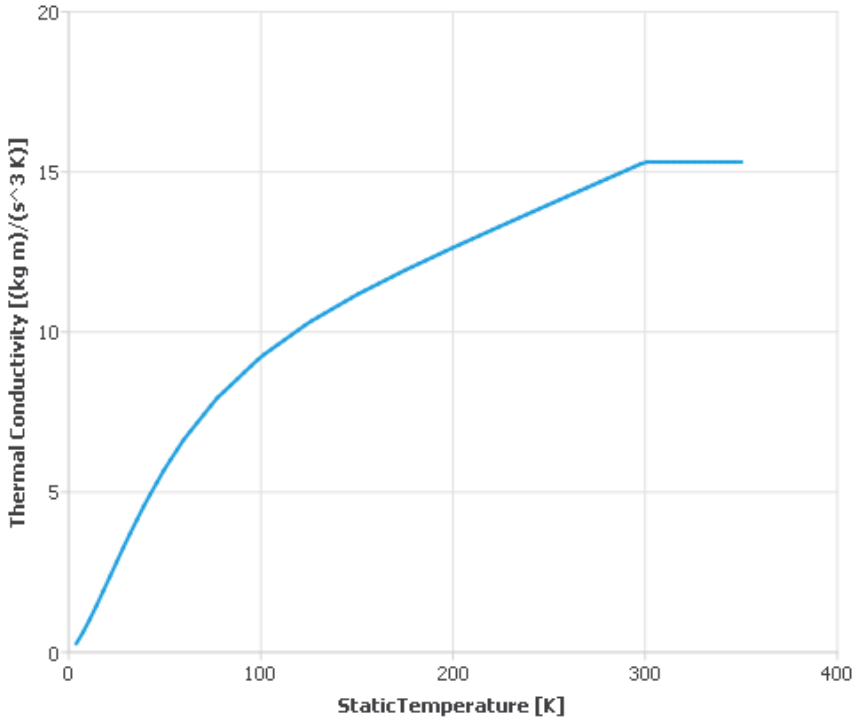


Abbildung **2**-5: In der Simulation verwendete Stoffdaten: Wärmeleitfähigkeit Edelstahl 304

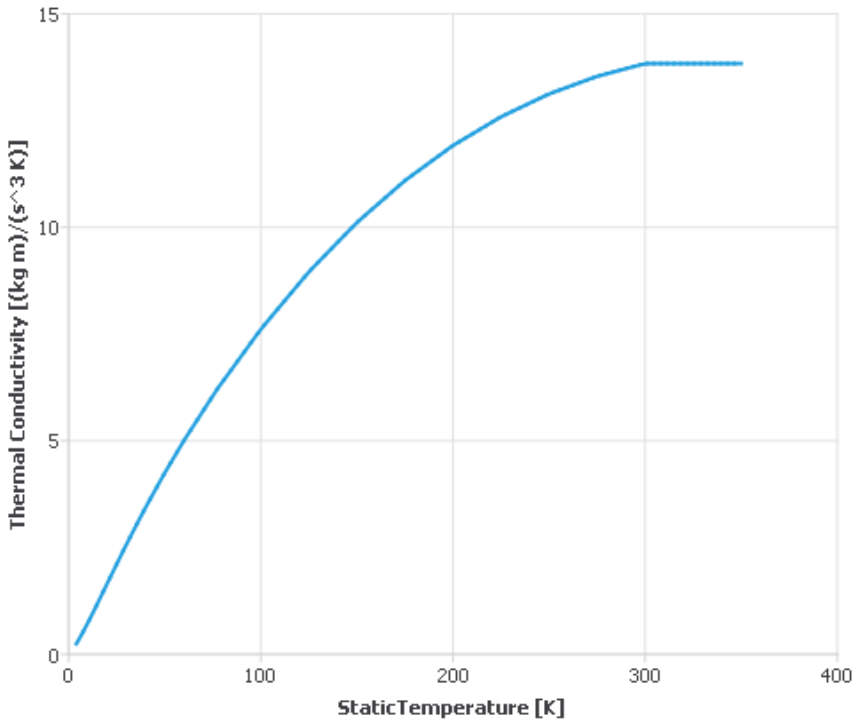


Abbildung **2**-6: In der Simulation verwendete Stoffdaten: Wärmeleitfähigkeit Invar Fe-36Ni

Für die Simulation werden die Materialdaten für die verwendeten Materialien Aluminium 5083-O (Moderatorgeometrie) und Edelstahl-304 (Methanleitungen) aus der „NIST Cryogenic Material Properties Database“ verwendet.

Die Edelstahl-304 Stoffdaten werden aus dem NIST-Fit der Veröffentlichung „Cryogenic Material Properties Database“ von E.D. Marquardt, J.P. Le und R. Radebaugh [23] errechnet.

Die Aluminium 5083-O Stoffdaten werden aus dem NIST-Fit [31] der Veröffentlichung „LNG-materials and -fluids“ von Douglas Mann [22] errechnet.

Die Invar Fe-36Ni Stoffdaten für Wärmeleitung werden aus den Daten der Veröffentlichung „Cryogenic Material Properties Database“ von E.D. Marquardt, J.P. Le und R. Radebaugh [23] übernommen.

Die Invar Fe-36Ni Stoffdaten liegen nur im Temperaturbereich $4\,\mathrm{K}$ bis $280\,\mathrm{K}$ vor. Für c_p liegen nur Daten bis $4\,\mathrm{K}$ bis $20\,\mathrm{K}$ vor. Die Stoffdaten werden bis $350\,\mathrm{K}$ mit den Werten für die höchste Temperatur erweitert. Da c_p für eine stationäre Berechnung nicht relevant ist, führt dies zu keiner Minderung der Lösungsqualität. Bei Feststoffen spielt die Wärmekapazität c_p ohnehin nur in transienten (zeitabhängigen) Simulationen eine Rolle; in der stationären Berechnung wird das thermische Gleichgewicht untersucht und c_p beeinflusst weder die Temperaturverteilung noch die Wärmeströme.

Spacer

Im Moderatorkryostaten werden die Bauteile durch Spacer aus Vespel SP-1 in der vorbestimmten Position gehalten. Die Spacer leiten ebenfalls Wärme von der Außenhülle des Vakuumbehälters in das System. Die Datenlage zur Wärmeleitfähigkeit für Vespel SP-1 im Bereich $4\,\mathrm{K}$ bis $300\,\mathrm{K}$ ist begrenzt. Es gibt eine Datenreihe für Tieftemperaturmessungen $0{,}3\,\mathrm{K}$ bis $4{,}2\,\mathrm{K}$ [35] und die Angaben zur Wärmeleitfähigkeit bei Raumtemperatur von DuPont [12]. Für die Stoffdatenbank der Simulation wird die Datenreihe eines anderen Polyimids (Kapton) verwendet, bei dem die Werte in gesamten interessanten Tepmeraturbereich bekannt sind (s. 2.3). Ein Faktor zur Anpassung der Kapton-Kurve wird aus den Wärmeleitungswerten bei $313\,\mathrm{K}$ errechnet ($\frac{\kappa_{\text{Vespel-Sp1, 313 K}}}{\kappa_{\text{Kapton, 313 K}}}$).

Für die Simulation werden folgende Daten verwendet:

Tabelle 2.3: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Vespel SP-1, ermittelt durch Skalierung der NIST-Polyimid-(Kapton-)Kurve [29, 34] mit dem Faktor $1{,}80$ zur Anpassung an den Datenblattwert von DuPont [12] bei $313\,\mathrm{K}$. Die Methode reproduziert auch Tieftemperaturmessungen an Vespel SP-1 [35, 38] mit einer Abweichung von $< 15\,\%$.

T [K]	k [W/(m K)]
4	0,020
10	0,042
20	0,086
50	0,175
77	0,226
100	0,256
150	0,294
200	0,316
250	0,331
300	0,346

3 Aufbau des 10K-Moderatorkryostaten

Dieses Kapitel enthält den Aufbau und eine Prozessbeschreibung des Moderatorkryostaten.

3.1 Entwurf und Bau des 10K-Moderatorkryostaten

Der Entwurf für den „Kryostat für einen kompakten kryogenen Neutronenmoderator“ wurde im Zuge der Dissertation von Alexander Schwab [37] für das HBS-Projekt erstellt, gebaut und im manuellen Betrieb erprobt. Der Kryostat stand für die Masterarbeit zur Verfügung und auf die CAD-Modelle konnte zugegriffen werden.

3.2 Konstruktion

Der 10K-Moderatorkryostat besteht aus drei trennbaren Haupteinheiten, einem vakuumisolierten Behälter mit flüssigem Kühlmittel (He oder N_2), einem Gasmanagementpanel (GMP) und dem Moderatorplug. Dazu kommen zusätzlich eine Lakeshore-Tieftemperatur-Messtechnik-Einheit, eine Scrollpumpe und eine Turbopumpe. Das Gasmanagementpanel, das Kühlmittelreservoir und der Moderatorplug sind mit geschraubten Leitungen verbunden und können im warmen Zustand getrennt werden.

3.3 Begriffdefinitionen der Konstruktion

Moderatorbehälter: Der Moderatorbehälter ist die Hülle des Volumens im inneren des Moderatorkryostaten, in dem das Moderatorgas erstarrt und in dem die Moderation der Neutronen stattfindet.

Moderatorgeometrie: Die Moderatorgeometrie beinhaltet den Moderatorbehälter, die

mäanderförmigen Wärmetauscherleitungen, durch die das Kühlgas fließt, und die Außenhülle um beides. Hier findet der Wärmeaustausch zwischen dem Moderatorgas und dem Kühlgas statt, sowie die zuvor beschriebene Neutronenmoderation.

Dewar: Ein doppelwandiger, evakuierter Behälter aus Edelstahl zur hocheffizienten thermischen Isolierung (Dewar). Der Dewar mit ca. $100\,\mathrm{l}$ flüssigem Kühlgas angeliefert. Ungefähr $2\,\mathrm{l}$ flüssiges Kühlgas verdampft im Dewar pro Tag durch interne Wärmeleitung des Dewar selbst.

Transferheber: Der Transferheber ist ein langer Stab mit einem internen Nadelventil, welches an der Spitze einer langen vakuumisolierten starren Leitung sitzt. Er wird oben in den Dewar eingeführt und bis auf den Boden des Dewar eingelassen und an der Einführungsstelle fest mit einer Schraubvorrichtung und Dichtringen eingeklemmt. Eine seitlich abgehende Leitung ist vakuumisoliert und wird in das Hüllrohr der Kühlmittelzuleitung eingelassen und mit einer Schraubvorrichtung und Dichtringen in dem Hüllrohr eingeklemmt.

Kühlleitungen: Die Kühlleitungen sind die Transportleitungen des Kühlmittels vom Dewar zur Moderatorgeometrie und von der Moderatorgeometrie zum GMP. Damit sind die Leitungen innerhalb der Vakuumisolierung der Moderatorplugs gemeint. Diese sind an der Kopfplatte des Moderatorplugs mit der Außenhülle der Vakuumisolierung verschweißt. Die Zuleitung hat eine Hüllrohrvorrichtung, in die eine vakuumisolierte Leitung, die vom Dewar kommt, eingeschraubt/eingeklemmt wird.

Moderatorgasleitungen: Die Moderatorgasleitungen sind die Transportleitungen des Moderatorgases vom GMP zur Moderatorgeometrie und von der Moderatorgeometrie zurück zum GMP. Damit sind die Leitungen innerhalb der Vakuumisolierung der Moderatorplugs gemeint. Diese sind an der Kopfplatte des Moderatoplugs mit der Außenhülle der Vakuumisolierung verschweißt.

Moderatorplug: Der Moderatorplug beinhaltet die Kühlleitungen, Moderatorgeometrie, MLI, Vakuumisolierung, Neutronenleiter und Strahlungsabschrimung. Der Plug dient der Durchführung des Kühlmittels, des Moderatorgases, des Isolationsvakuums und den kalten Neutronen durch das Strahlungsschild der Targetstation. Dieser ist baugleich mit anderen Plugs, sodass an der gleichen Stelle verschiedene Experimente mit separaten Plugs vorbereitet und in kurzen Zeitabständen gewechselt werden können.

: Das GMP ist die zentrale Steuereinheit zur Überwachung, Regelung und Verteilung von Gasen im Moderatorkryostaten. Es steht außerhalb der Targetstation und ist mit Moderatorplug, Dewar und den Druckgasflaschen für Kühlgas, Moderatorgas und Inertisierungsgas verbunden.

Targetstation: Die Targetstation beinhaltet das Strahlungsschild, das Target, die Protonenstrahldurchführung, die Kühlung des Targets, den thermischen Moderator, den Neutronenreflektor und diverse Mess- und Betriebselektronik. In der Targetstation werden die Neutronen erzeugt und die Station schirmt den umgebenden Bereich gegen die erzeugte Strahlung ab.

3.4 Prozessbeschreibung

Das GMP setzt mithilfe einer Druckgasflasche die Gasphase über dem flüssigen Kühlgas im Kühlmittelbehälter (Dewar) unter Druck. Der Druck drückt flüssiges Kühlmittel über den Transferheber, dessen Öffnung zum Boden des Kühlmittel-Dewars in die flüssige Phase reicht, durch den Kryostaten. Dabei wird die Kühlleistung über ein Nadelventil im Transferheber und einen Massendurchflussregler ($\mathrm{MFC_{He}}$) am Ende der Kühlmittelleitung gesteuert. Über den $\mathrm{MFC_{He}}$ wird die verbrauchte Menge an Helium oder Stickstoff momentan und integral gemessen.

Über das GMP wird der Moderatorbehälter mit dem Moderatorgas aus einer Gasflasche befüllt. Der Massefluss wird hier durch einen Massendurchflussregler ($\mathrm{MFC_{CH_4}}$) begrenzt und gemessen.

Der Moderatorbehälter liegt am Ende des Moderatorplugs und wird dort direkt vom dem Kühlmittel umströmt. So wird die thermische Energie im Moderatorgas abtransportiert und das Gas gekühlt. Abhängig von der Solltemperatur ist das Moderatorgas im Moderatorbehälter flüssig oder fest.

Das Kühlgas wird nach dem Verlassen des Moderatorplugs durch eine Heizung am GMP aufgewärmt, um eine konstante Messung des Masseflusses (s. 3.6.1) zu gewährleisten und das GMP nicht einzufrieren oder durch Kondenswasser zu beschädigen.

Mit dem gekühlten Moderatorgas, welches für Messungen meist flüssig oder fest im Moderatorbehälter vorliegt, werden Neutronen moderiert. Hierbei können das Moderatorgas und das Kühlmittel schnell ausgetauscht werden, um neue Moderatorgase zu erforschen. Der Moderatorbehälter kann in diesem Moderatokryostaten leicht gewechselt werden, sodass verschiedene Geometrien getestet werden können.

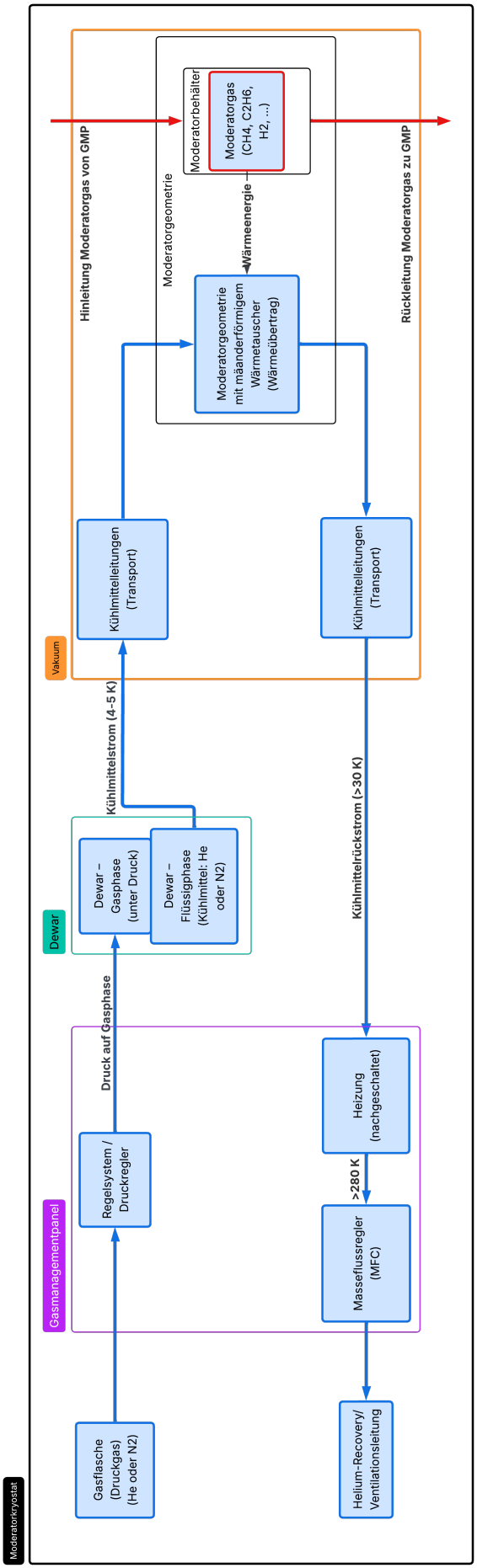


Abbildung **3**-1: Vereinfachtes Diagramm der Prozessbeschreibung

3.4.1 Neutronenweg

Die Neutronen entstehen, indem Protonen auf das Target geschossen werden (s. Abb. **3**-2). Die hochenergetischen Neutronen werden in den folgenden Bildern (s. Abb. **3**-2, **3**-3 und **3**-4) rot, die thermischen Neutronen grün und die kalten Neutronen blau dargestellt. Hochenergetische Protonen werden orange dargestellt.

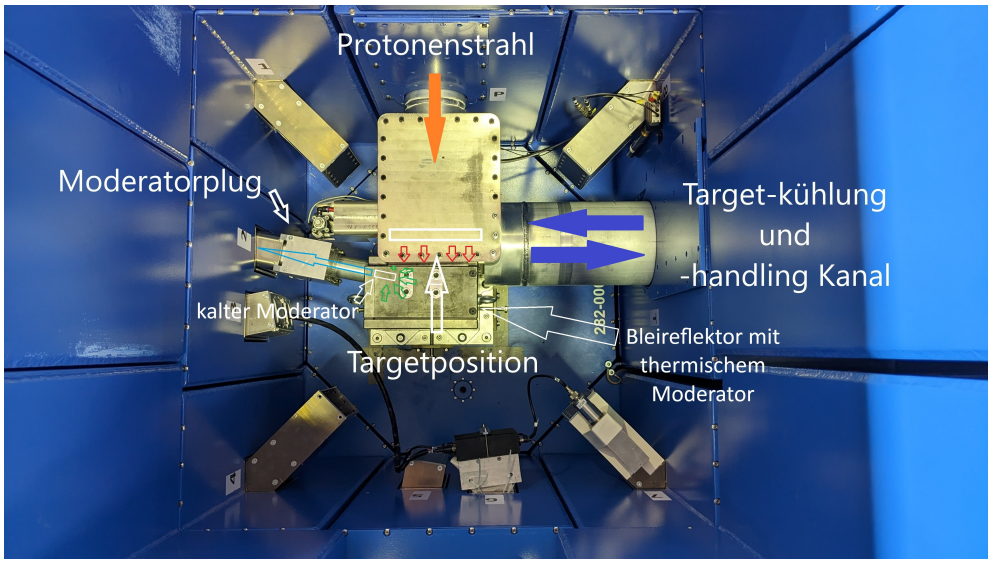


Abbildung **3**-2: Target Station von oben (Abb. **1**-3)

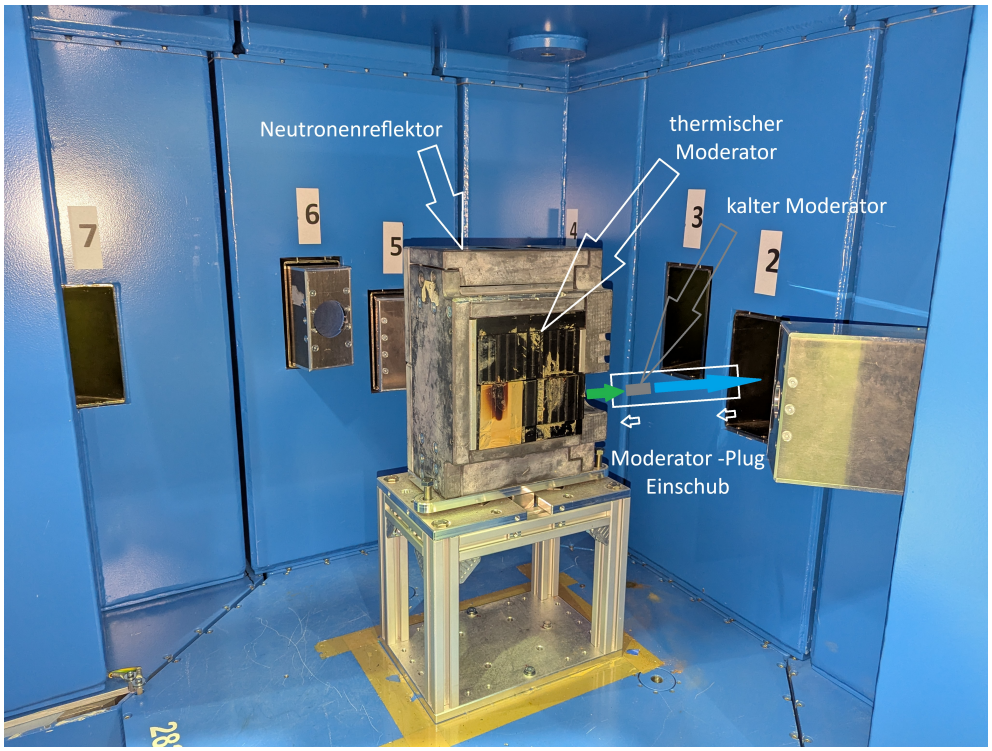


Abbildung **3**-3: Thermischer Moderator aus Polyethylene mit Neutronenreflektor aus Blei (s. Abb. **3**-12 für die Position des Moderatorplugs)

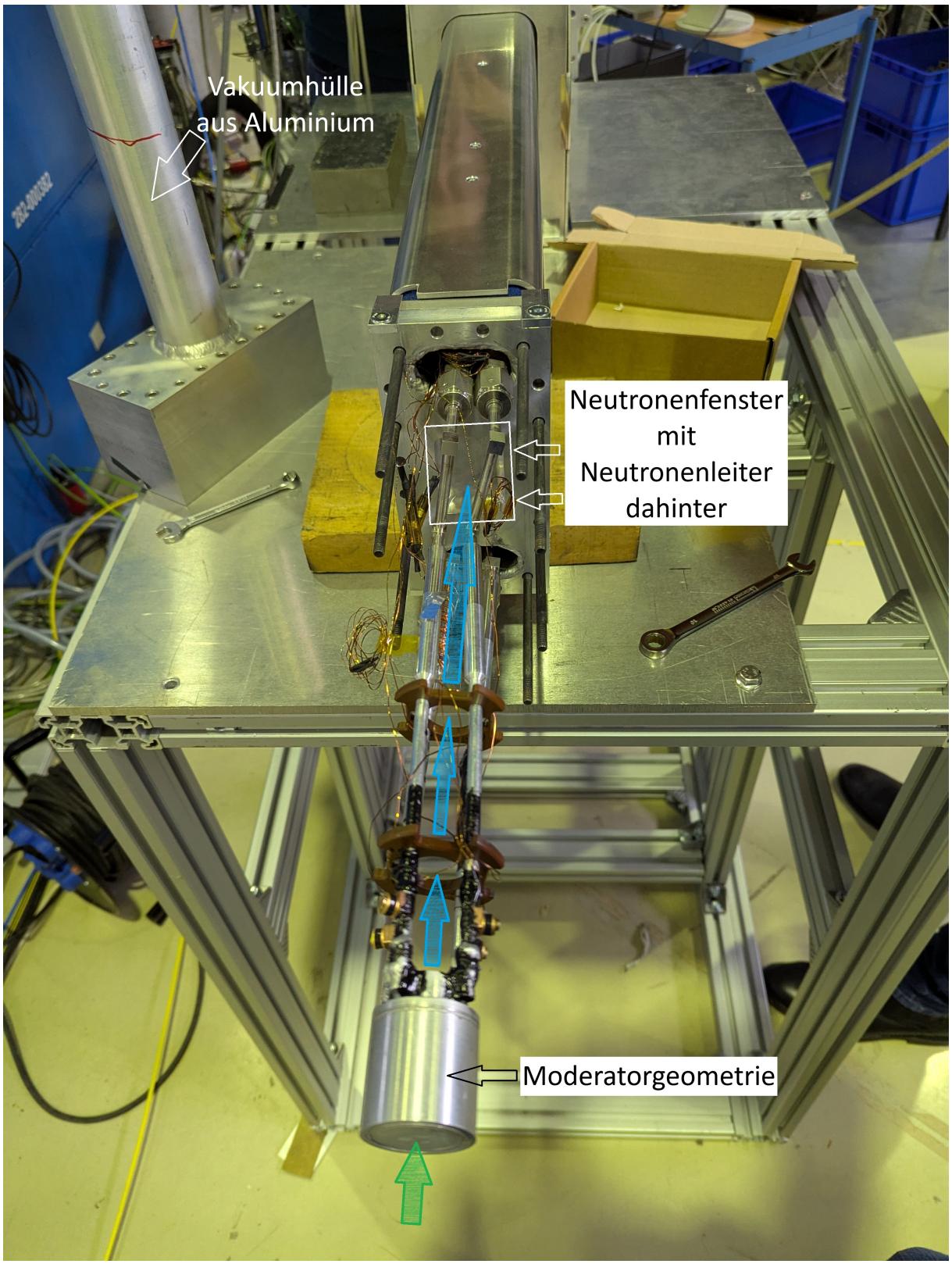


Abbildung **3**-4: Inneres des Moderatorplugs

3.5 Kryostat

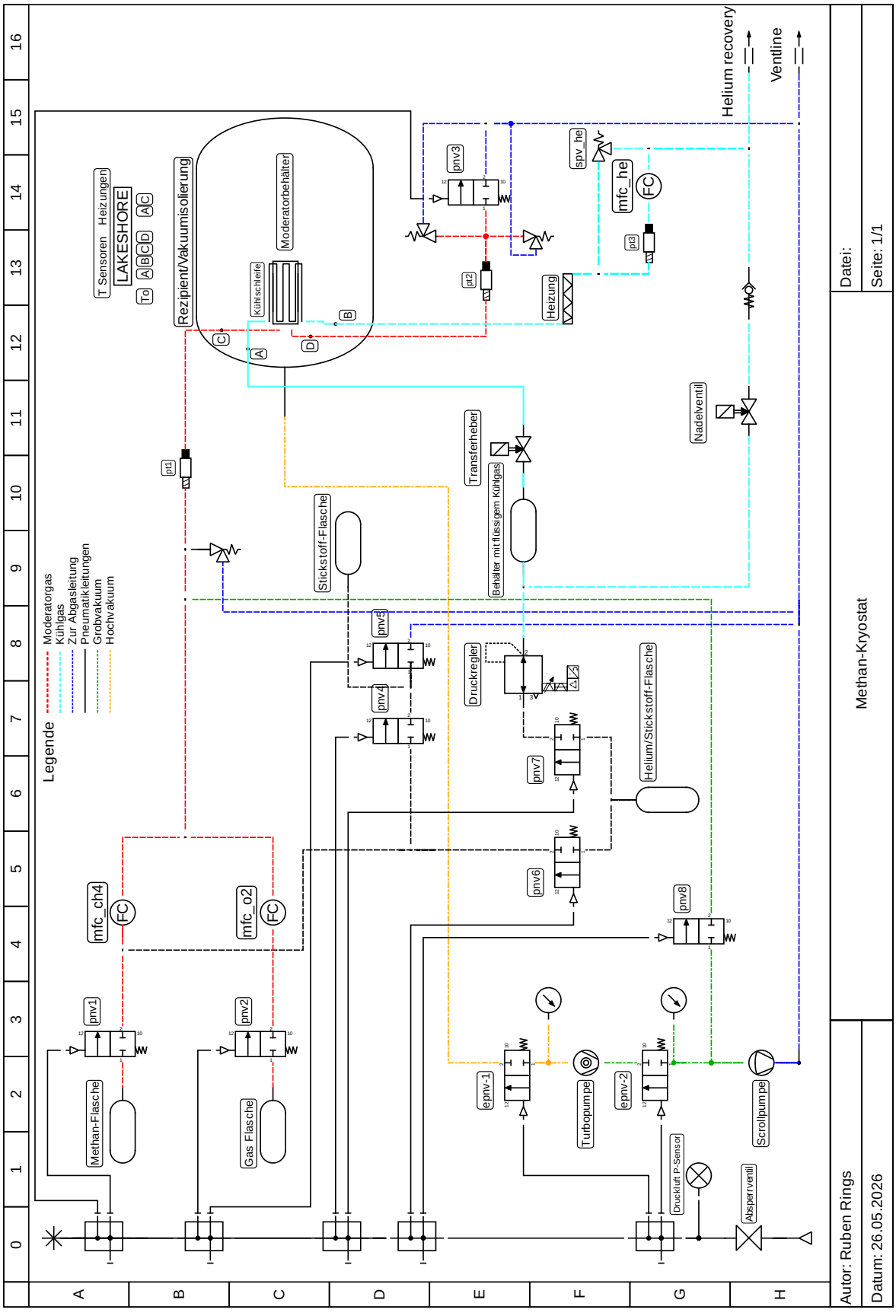


Abbildung **3**-5: Schaltplan des Kryostaten

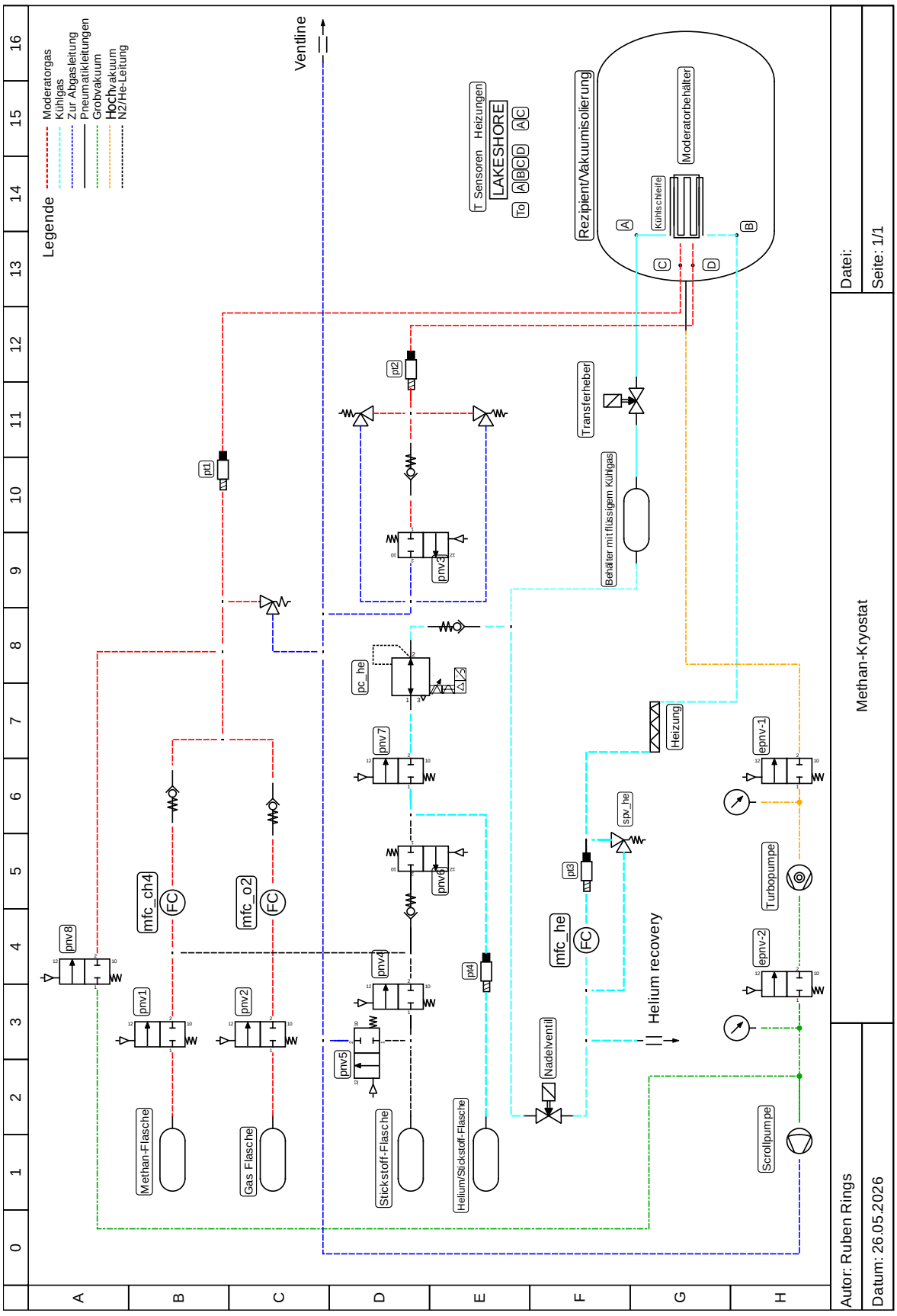


Abbildung **3**-6: Schaltplan des Kryostaten ohne Pneumatik

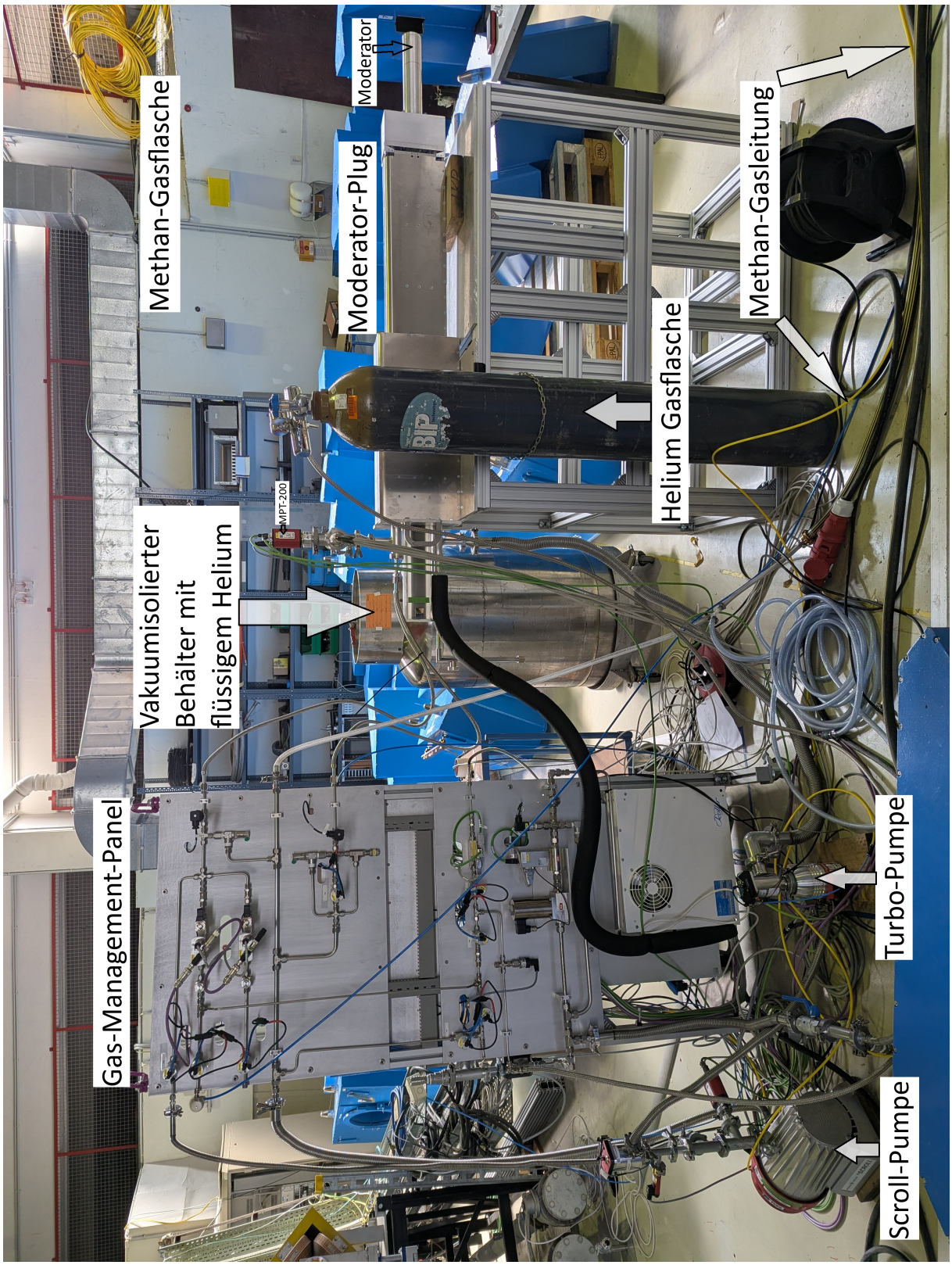


Abbildung **3**-7: Gesamter Aufbau des Kryostaten für den Betrieb (ohne Moderatorgasflasche, die steht im Gasschrank für explosive Gase)

Die technischen Zeichnungen **3**-5 und **3**-6 zeigen den Aufbau des Kryostaten (s. Abb.**3**-7). Die Bereiche sind farblich gekennzeichnet.

- rot: Moderatorgas
- grün: Grobvakuum
- gelb: Hochvakuum
- hellblau: Kühlgas
- schwarz: Inertisierungsgas
- dunkelblau: Abgasleitung

Die Teileliste mit Funktionsbeschreibung:

Pneumatikventil: pnv1 - Trennung Methan-Gasflasche/GMP - Moderatorkreislauf füllen

Pneumatikventil: pnv2 - Trennung Gasflasche für Mischgas für Moderator/GMP - Moderatorkreislauf füllen

Pneumatikventil: pnv3 - Trennung Moderatorkreislauf/Abgassleitung -Moderatorkreislauf entleeren

Pneumatikventil: pnv4 - Trennung Inertisierungsgasflasche/Moderatorkreislauf - Inertisierung des Moderatorkreislaufes

Pneumatikventil: pnv5 - Trennung Inertisierungsgasflasche/Abgasleitung - Inertisierung der Abgasleitung

Pneumatikventil: pnv6 - Trennung Kühlmittelgasflasche/Moderatorkreislauf - Inertisierung des Moderatorkreislaufs

Pneumatikventil: pnv7 - Trennung Kühlmittelgasflasche/PC_{He} - Gas und Druck liefern, damit der PC_{He} den Druck erhöhen kann

Pneumatikventil: pnv8 - Trennung Moderatorkreislauf/Scrollpumpe - Evakuieren des Moderatorkreislaufs

Pneumatikventil: epnv1 - Trennung Rezipient (Vakuumisolierung)/Turbopumpe - Isolieren des Rezipienten von der Turbopumpe

Pneumatikventil: epnv2 - Trennung Scrollpumpe/Turbopumpe - Isolieren des Rezipienten und der Turbopumpe von der Scrollpumpe

Bauteil: Scrollpumpe - Vakuumpumpe für Grobvakuum bis $0{,}1$ mbar

Bauteil: Turbopumpe - Vakuumpumpe für Hochvakuum bis $1 \cdot 10^{-7}$ mbar

Bauteil: pt1 - Drucksensor Moderatorkreislauf Einlassseite

Bauteil: pt2 - Drucksensor Moderatorkreislauf Auslassseite

Bauteil: pt3 - Drucksensor Kühlmittelauslass

Bauteil: pt4 - Drucksensor Vordruck PC_{He} von der Kühlmittelgasflasche

Bauteil: pt_input - Drucksensor für Druckluftversorgung

Bauteil: MPT-200 - Druckmessröhre für Hochvakuum bis zu $5 \cdot 10^{-9}$ mbar

Bauteil: PPT-200 - Druckmessröhre für Vorvakuum bis zu $1 \cdot 10^{-4}$ mbar

Bauteil: Transferheber - Langer Heber mit Nadelventil, über den flüssiges Kühlmittel aus dem Dewar in den Moderatorplug geleitet wird (maximaler Öffnungsgrad entspricht etwa einer Steuerspannung von $8\,\mathrm{V}$)

Bauteil: Nadelventil - elektrisch steuerbares Nadelventil zum Ablassen von Druck aus der Gasphase des Dewar

Bauteil: $\mathrm{MFC_{He}}$ - Misst und regelt den Massestrom vom Kühlmittel durch das Gerät am Kühlmittelauslass

Bauteil: $\mathrm{MFC_{Ch_4}}$ - Misst und regelt den Massestrom des Moderatorgases am Moderatorkreislauf-Einlass

Bauteil: $\mathrm{MFC_{O_2}}$ - Misst und regelt den Massestrom des Moderatormischgases am Moderatorkreislauf-Einlass

Bauteil: $\mathrm{PC_{He}}$ - Misst Druck und lässt Gas nachströmen bis Solldruck erreicht ist

Bauteil: Vakuumisolierung - Isoliert die Moderatorgeometrie und die Leitungen des Kühlmittels und des Moderatorkreislaufes thermisch

Bauteil: Moderatorbehälter (Teil der Moderatorgeometrie) - Beinhaltet bei Betrieb das flüssige/feste Moderatorgas in einem zylindrischen Volumen. Der Inhalt moderiert die Neutronen

Bauteil: Kühlschleife (Teil der Moderatorgeometrie) - Eine Art Wärmetauscher, bei dem die Wärme in der Moderatorgeometrie an das Kühlmittel abgegenen wird

Bauteil: Abgasleitung - Eine Leitung, die aus dem Gebäude führt, über die $\mathrm{CH_4}$, $\mathrm{H_2}$ oder andere Gase sicher abgeblasen werden können

Bauteil: Helium Rückgewinnungsleitung - Eine Leitung zur Rückgewinnung von Helium nachdem dieses durch das Kühlen des Kryostaten erwärmt wurde

Bauteil: Lakeshore Temperaturregler: Dient als Tieftemperaturmessgerät mit 4 Silizium-Dioden ($1{,}4 - 500\,\mathrm{K}$ Messbereich). Besitzt zwei Heizungssysteme mit Regelsystemen für Tieftemperaturregelung, welche die Werte der Silizium-Dioden als Regelwert benutzen können

Der drucklose Zustand aller Ventile ist geschlossen. Alle pt Drucksensoren messen gegen den Atmosphärendruck.

Evakuierungspumpen

Der Kryostat hat eine Scrollpumpe mit ATEX-Zertifizierung als Vorpumpe für eine Turbopumpe. Über die Turbopumpe wird die Vakuumisolierung des Rezipienten evakuiert. Die Scrollpumpe funktioniert auch als Evakuierungspumpe zum Reinigen des Moderatorgaskreislaufs.

3.5.1 Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)

Das GMP hat eine SPS verbaut. Die SPS ist mit allen Bauteilen am GMP, der Scrollpumpe, der Turbopumpe, dem Transferheber, dem MPT-200 und dem PPT-200 verbunden. NICOS ist über eine OPC-Schnittstelle mit der Steuerung (SPS) verbunden und liest kontinuierlich alle angeschlossenen Sensoren und Stellglieder aus. Zusätzlich ist NICOS über LAN mit dem Lakeshore-Tieftemperaturregler verbunden. Die Automatisierung ist komplett in NICOS programmiert und steuert alle Bauteile des Moderatorkryostaten über diese Software-Schnittstelle.

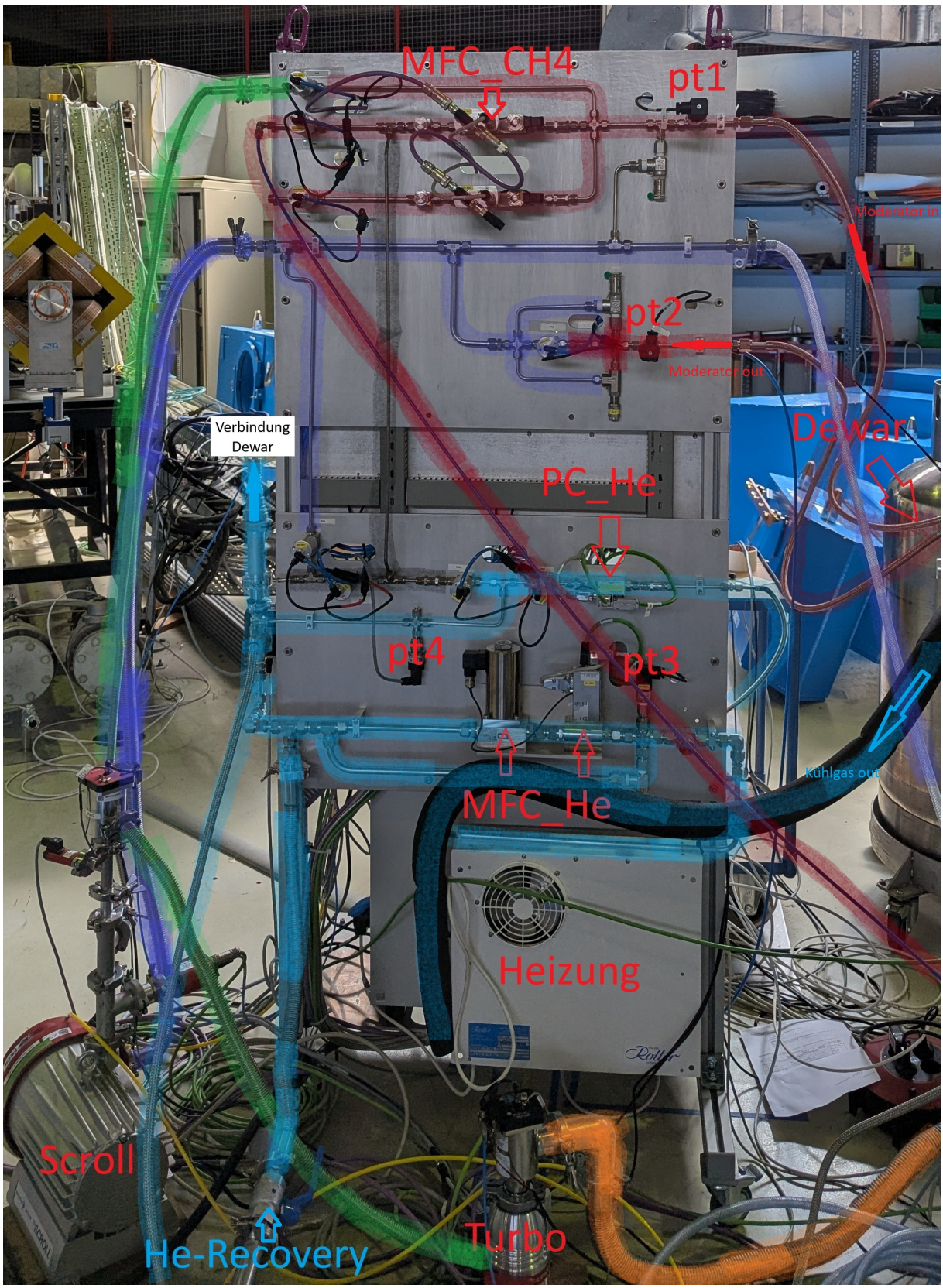


Abbildung **3**-8: (farbkodiert wie **3**-6)

3.5.2 Moderatorplug

[1] Der Moderatorplug bildet die Durchführung durch das Strahlungsschild der Neutronenquelle. Der Moderatorplug besteht aus der Moderatorgeometrie, der Außenhülle des Isolationsvakuums, den Moderatorgasleitungen, der Kühlgas Zu- und Rückleitung, Spacern und der Strahlungsabschirmung (s. Abb. **3**-11). Der Moderatorplug wird in eine dafür vorgesehene Öffnung (s. Abb. **3**-13) in der Target-Station (s. Abb. **1**-3) der Neutronenquelle eingesetzt. Die Kühlgas-Leitungen im Moderatorplug sind aus Invar[2] gefertigt, einem Material mit einem besonders niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Damit soll verhindert werden, dass das Moderatorbehältnis sich durch die temperaturabhängige Längenänderung der Leitungen aus dem Einsatzbereich bewegt.



Abbildung **3**-9: CAD: Außenhülle der Vakuumisolierung des Kryostaten im Moderatorplug

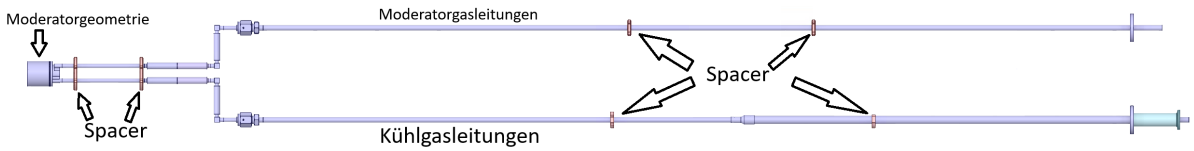


Abbildung **3**-10: CAD: Interne Leitungen und Moderatorbehältnis des Kryostaten

[1] Dieser Abschnitt wurde teilweise aus der Bachelorarbeit des Autors [33] übernommen und angepasst.
[2] Alloy 36: 64% Eisen 36% Nickel

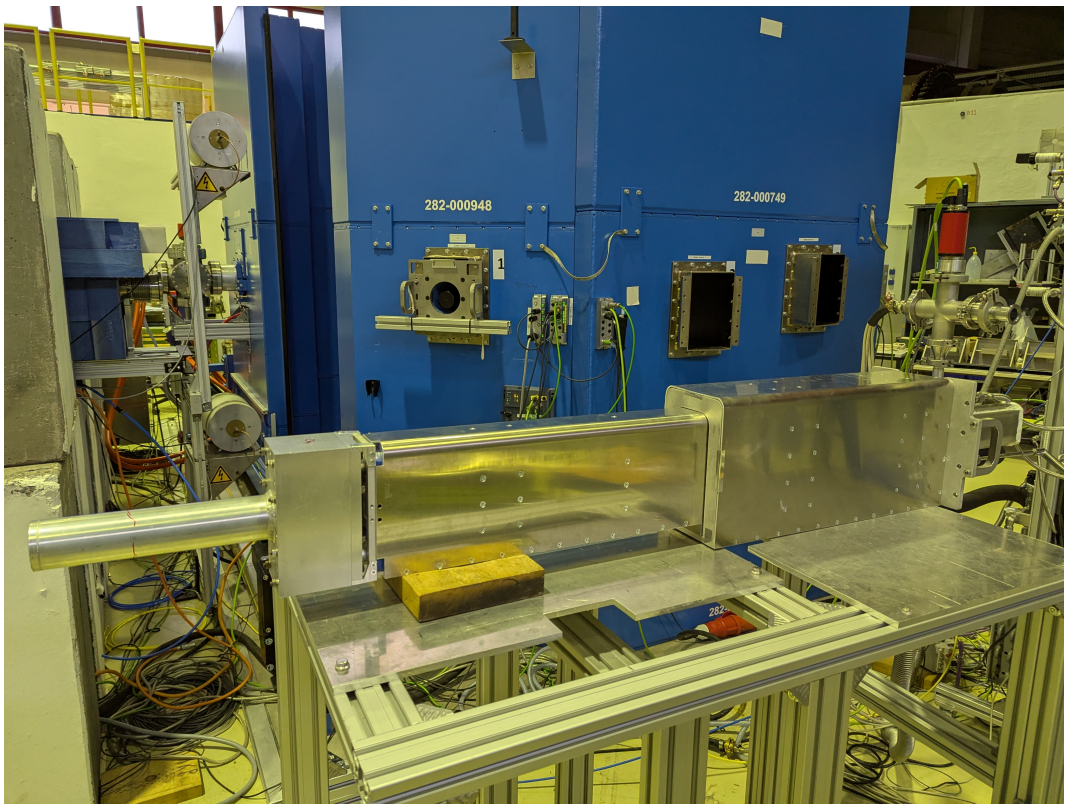


Abbildung **3**-11: Moderatorplug vor der Target Station mit Einschub-Öffnungen



Abbildung **3**-12: Moderatorplug innerhalb der Strahlungabschirmung (endet im thermischen Moderator (schwarz) innerhalb des Neutronenreflektors aus Blei (gräulich))

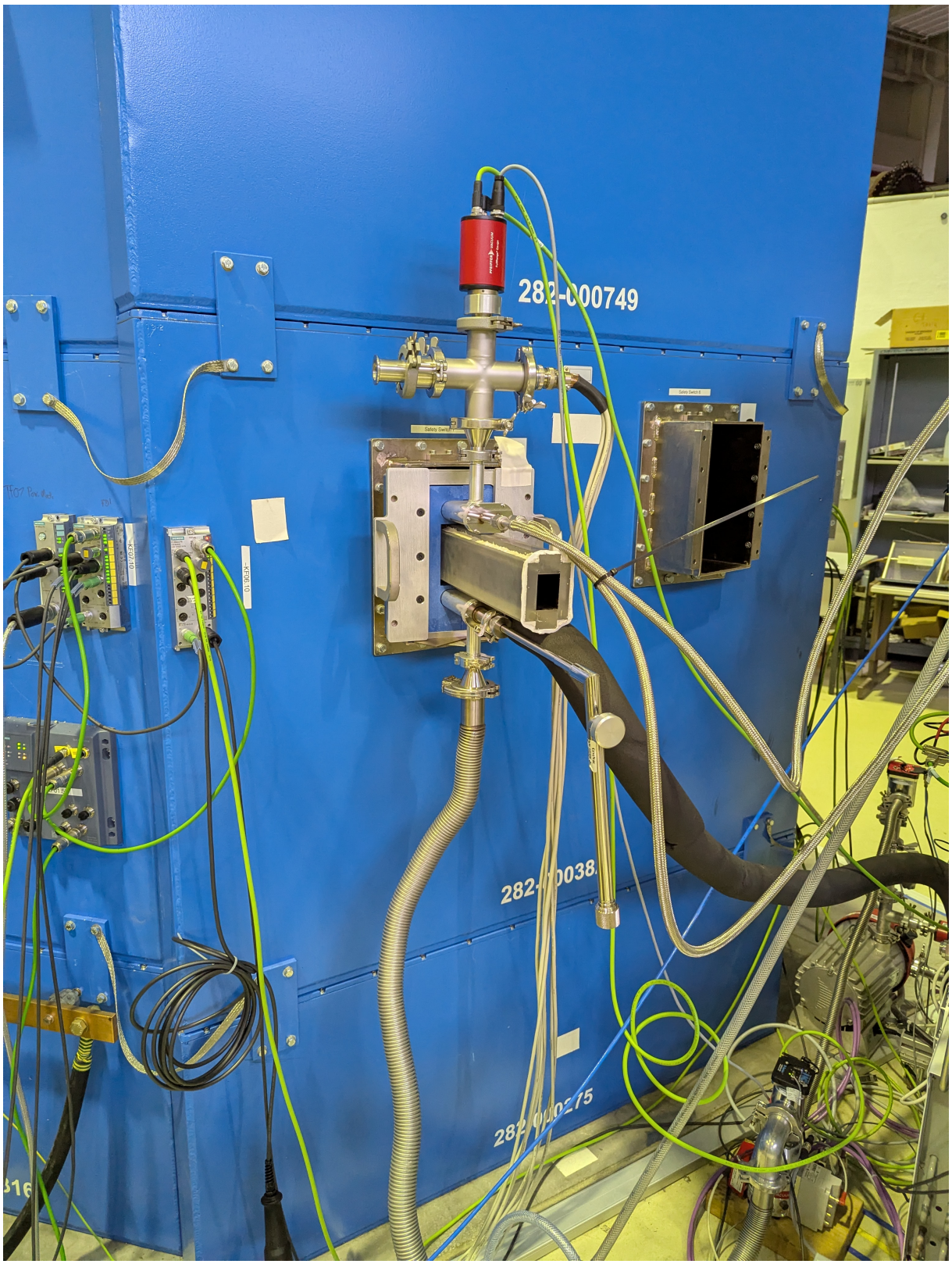


Abbildung **3**-13: Moderatorplug eingebaut in die Abschirmung der Targetstation (blau) der Neutronenquelle. Oben ist der Drucksensor MPT-200 (rot)

Moderatorgeometrie

Der Moderatoraufbau besteht aus einem inneren Moderatorvolumen **3**-14 und einer äußeren He/N_2 Kühlung **3**-15. Der Moderatorbehälter bildet über die oberen Kanäle **3**-16 mit dem GMP den Moderatorkreislauf. Der Moderatorbehälter wird von einer mäanderförmig geführten Kühlleitung umgeben, durch die das kalte Helium oder der kalte Stickstoff strömt. Die mäanderförmigen Wärmetauscherleitungen bilden mit den Kühlgasleitungen **3**-17 den Kühlgaskreislauf.

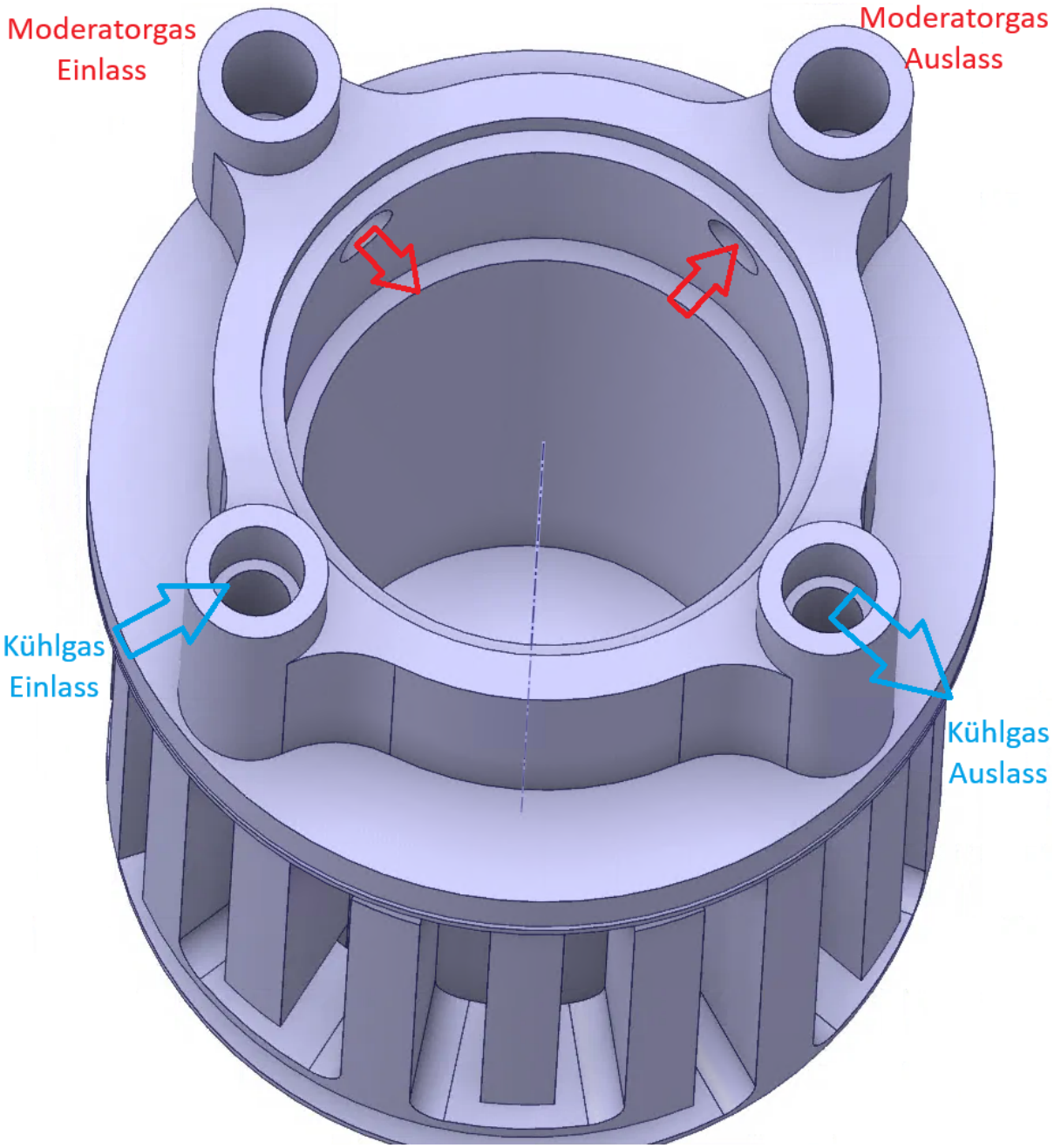


Abbildung **3**-14: Moderatorvolumen innen um die eingezeichnete Zylinderachse im Moderator

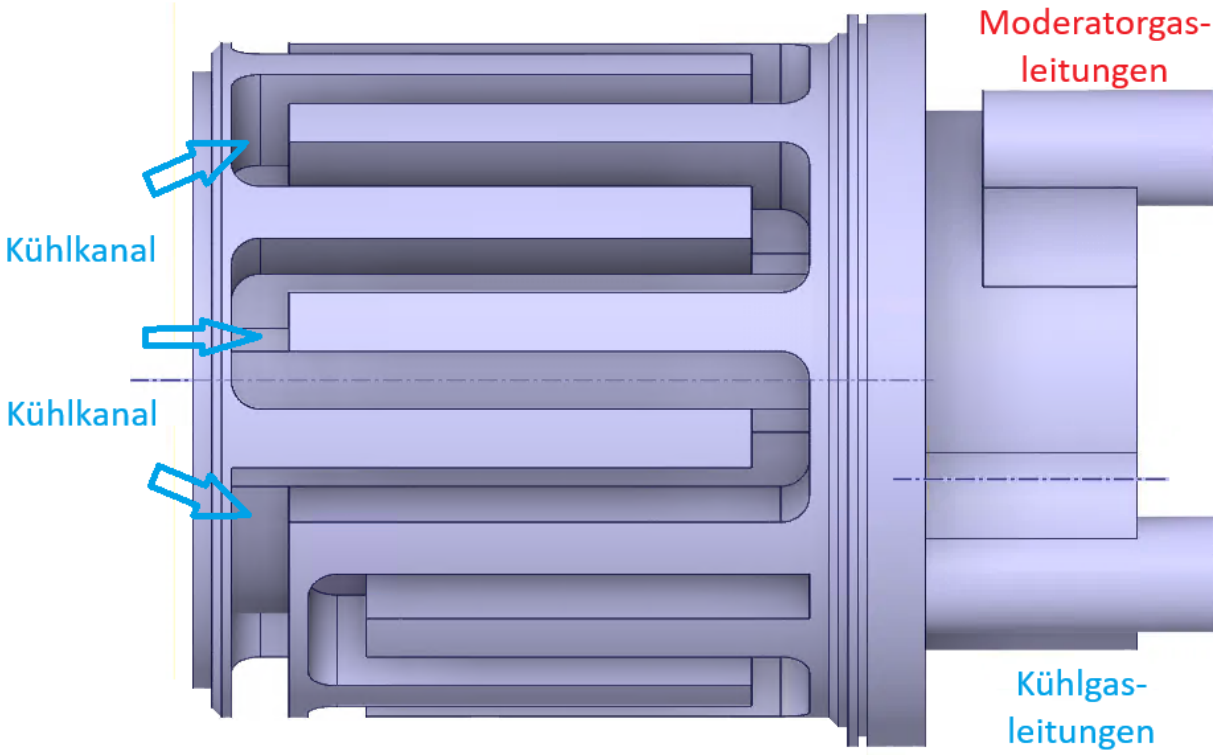


Abbildung **3**-15: Moderator ohne äußere Kappe - mäanderförmiger Kühlkanal auf der Hülle des Moderatorvolumens

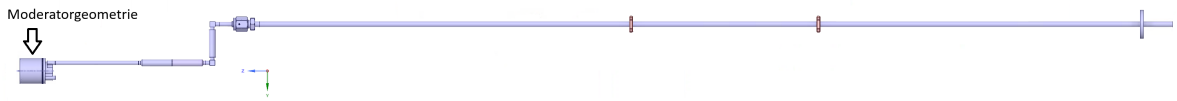


Abbildung **3**-16: Moderatorgeometrie mit Moderatorgasleitungen

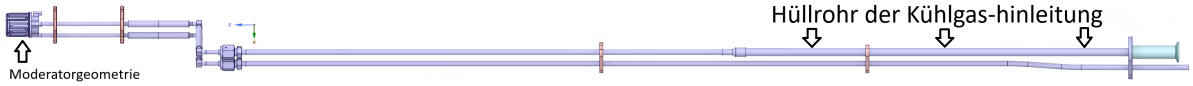


Abbildung **3**-17: Moderatorgeometrie mit Kühlgasleitungen

Wärmetransport im Kryostaten

Der Kryostat hat haupsächlich Wärmeeinträge durch Wärmestrahlung und Festkörper-wärmeleitung. Die Wärmeleitung durch Gase ist durch die Vakuumisolierung so niedrig, dass diese nicht weiter betrachtet wird.

Der Wärmeaustausch über Wärmestrahlung mit der Vakuumaußenhülle wird an der Kühlgaszuleitung und den Moderatorleitungen durch MLI reduziert. Die Wärmeeinträge durch Wärmeleitung sind Kühlgaszuleitung (MLI), Kühlgasrückleitung, Moderatorleitungen, Moderatorgeometrie Außenhülle und Aluminiumleitungen, welche an die Moderatorgeometrie angeschweißt sind (s. Abb. **3**-18).

Die Wärmeeinträge durch Festkörperwärmeleitung entstehen durch die Gasleitungen, welche mit der Vakuumaußenhülle an der Kopfplatte des Moderatorplugs verschweißt sind, und über die Spacer. Die Wärmeeinträge fließen über verschiedene Wege in das Kühlmittel (s. Abb. **3**-18).

Da die Wärmeleitfähigkeit von dem Leitungsmaterial (Invar 36, Edelstahl 304 und Al 5083-O) wesentlich höher ist, als das vom hauptsächlich gasförmigen Kühlmittel im Kryostaten, werden die Wärmeeinträge der Spacer über eine wesentlich größere Fläche im Inneren des Rohres an das Kühlmittel abgegeben. Dadurch entstehen Temperaturgradienten abfallend von den Berührungspunkten der Spacer mit den Leitungen (s. Kap. **7**-8). Zudem leiten die Spacer nahe der Moderatorgeometrie Wärmeenergie von den Methanleitungen zu den Heliumleitungen.

Die minimal erreichbare Temperatur des Moderatorgases im Moderatorbehälter hängt von den Wärmeeinträgen durch Strahlungseinträge und Festkörperwärmeleitung der Helium-Zuleitung, der Methan-Leitungen und der Moderatorgeometrie ab. Die Wärmeeinträge an der Helium-Rückleitung sind dafür nahezu vernachlässigbar.

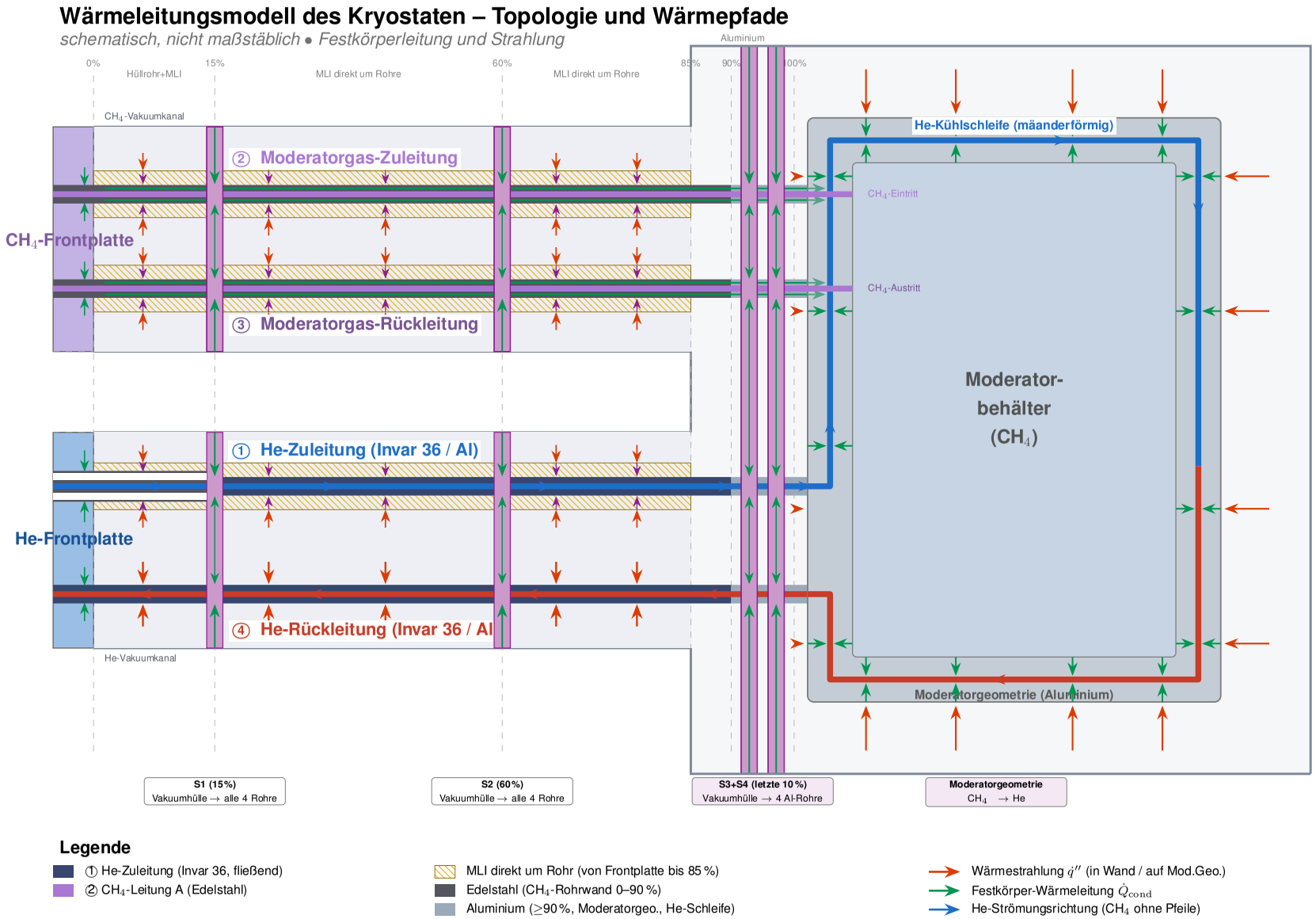


Abbildung **3**-18: Wärmeleitungsmodell des Kryostaten

Neutronen- und Strahlungsabschirmung

Die Neutronen- und Strahlungsabschirmung besteht aus boriertem Polyethylen und Bleiplatten. Die Bleiplatten schirmen die Gamma-Strahlung und die höchstenergetischen Neutronen ab. Polyethylen dient als Moderator für die Neutronen, Bor als Neutronen-Absorber. Die Platten sind periodisch im Moderatorplug aufgereiht (s. Abb. **3**-19). Der Moderatorplug dieses Kryostaten hat zwei Durchführungen für vakuumisolierte Leitungen. Die zweite Durchführung befindet sich im unteren Teil (Aufbau sichtbar in **3**-13).

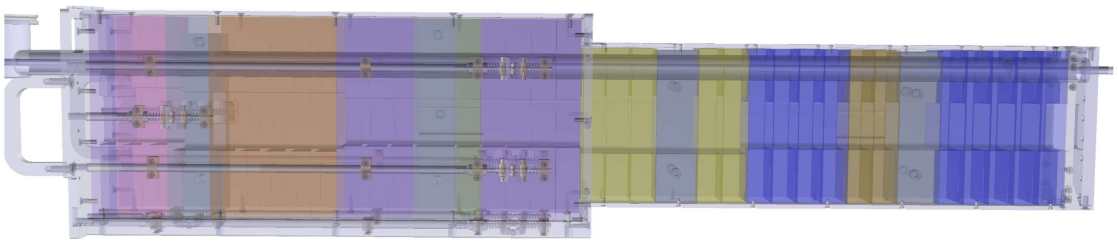


Abbildung **3**-19: CAD: Neutronen- und Strahlungsabschirmung des Moderatorplugs (farbige Platten = BorPE-Platten, graue Platten dazwischen = Bleiplatten)

3.6 Physikalische Mess- und Regelungstechnik

An dem Kryostaten sind die hier aufgelisteten Sensoren verbaut:

Sensoren	Anzahl	Messgerät	Messgröße	Messbereich
Silizium-Diode	4	Lakeshore	Temperatur	$1,4 - 500\,\mathrm{K}$
Pfeiffer PPT-200	1	PPT-200	Druck	$1 \times 10^{-4} - 1000\,\mathrm{mbar}$
Pfeiffer MPT-200	1	MPT-200	Druck	$5 \times 10^{-9} - 1000\,\mathrm{mbar}$
WIKA IS-3 (ATEX)	2	Siemens S7	Druck	$-1\,\mathrm{bar_{dif}} - 5\,\mathrm{bar_{dif}}$
WIKA A-10	1	Siemens S7	Druck	$-1\,\mathrm{bar_{dif}} - 3\,\mathrm{bar_{dif}}$
WIKA A-10	1	Siemens S7	Druck	$-1\,\mathrm{bar_{dif}} - 9\,\mathrm{bar_{dif}}$
FESTO SDE1	1	FESTO SDE1	Druck	$0\,\mathrm{bar_{dif}} - 10\,\mathrm{bar_{dif}}$
Bronkhorst F-201CI	2	FG-201CI	Massefluss	bis zu $0,02\,\mathrm{g/s}$ CH_4
Bronkhorst F-112AC	1	F-112AC	Massefluss	bis zu $0,6\,\mathrm{g/s}$ He
Bronkhorst P-602CV	1	P-602CV	Druck	bis zu $10\,\mathrm{bar_{abs}}$

Tabelle 3.1: Liste aller Sensoren

3.6.1 Bronkhorst-Massedurchflussregler

In jedem Massedurchflussregler (MFC) ist ein Massedurchflusssensor für die Regelung des internen Ventiles verbaut. Dieser Sensor funktioniert nach dem thermischen Bypass-Prinzip.

Es gibt ein laminares Strömungselement, den Hauptkanal, und eine Bypass-Kapillare, durch die ein Bruchteil des Gesamtmassestroms fließt. Um die Kapillare sind zwei Widerstandselemente gewickelt. Eines ist stromaufwärts und das andere stromabwärts verbaut. Diese dienen als Heizelemente und Temperatursensoren gleichzeitig. Bei keinem Massestrom ist die Temperaturverteilung gleich. Bei Durchfluss wird vom Widerstandselement stromaufwärts Wärme zum Widerstandselement stromabwärts transportiert. Die entstehende Temperaturdifferenz ΔT ist proportional zum Massestrom. [7]

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T [7] \tag{3.1}$$

Die Geräte sind gasabhängig und auf ein Gas kalibriert. Das Kalibrierungsgas findet sich in der Bezeichnung des Bauteiles wieder. Die Masseflussregler werden intern in NICOS mit einem Gaskonversions-Faktor F_{GK} umgerechnet, wenn Gase, welche nicht

der Kalibrierung entsprechen, verwendet werden. In 3.6.2 sind alle relevanten Formeln für die in NICOS eingebauten Umrechnungen zwischen den verwendeten Gasen und von Massestrom zu Gasliterstrom l_{gas}/s und Flüssigliterstrom $l_{\text{flüssig}}/s$ aufgeführt. [7]

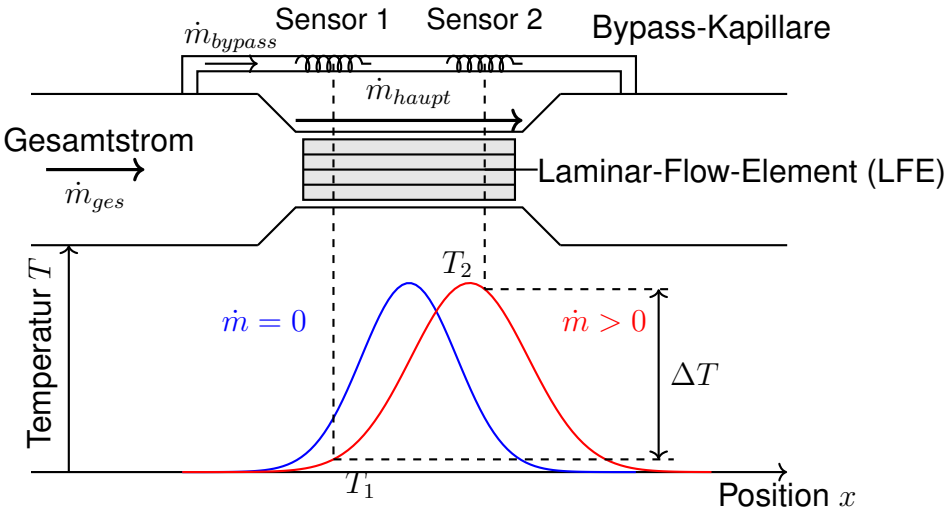


Abbildung **3**-20: Funktionsprinzip eines thermischen Massendurchflussmessers nach dem Bypass-Prinzip. Oben: Aufteilung des Gasstroms in Hauptkanal mit Laminar-Flow-Element und Bypass-Kapillare mit zwei Heiz-/Sensorelementen. Unten: Temperaturverteilung entlang der Kapillare bei Nullfluss (blau) und bei Durchfluss (rot, asymmetrisch verschoben).

3.6.2 Formeln für thermische Massestromsensoren

Massestrom aus Wärmestrom

$$\dot{m} = \frac{Q}{\Delta T \cdot c_p} \tag{3.2}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_1 \cdot c_{p,1} \cdot \Delta T = \dot{m}_2 \cdot c_{p,2} \cdot \Delta T \tag{3.3}$$

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = \frac{c_{p,1}}{c_{p,2}} \tag{3.4}$$

$$F_{\text{GK}} = \frac{c_{p,1}}{c_{p,2}} \tag{3.5}$$

wobei:

- $\dot{m}$ = Massestrom [kg/s]
- Q = Wärmestrom [W]
- ΔT = Temperaturdifferenz [K]

- c_p = spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]

Umrechnung von Massestrom zu Volumenstrom

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{d_{\text{gas}}} \tag{3.6}$$

wobei:

- $\dot{V}$ = Volumestrom [m³/s]
- d_{gas} = Gasdichte [kg/m³]

Gasartabhängige Umrechnung des Volumenstroms

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 \cdot \frac{c_{p2} \cdot d_2}{c_{p1} \cdot d_1} \tag{3.7}$$

wobei:

- $\dot{V}_1, \dot{V}_2$ = Volumenströme an Position 1 und 2 [m³/s]
- c_{p1}, c_{p2} = spezifische Wärmekapazitäten [J/(kg·K)]
- d_1, d_2 = Dichten [kg/m³]

Umrechnung in Flüssigliter

$$\dot{V}_{\text{flüssig}} = \dot{V}_{\text{gas}} \cdot \frac{d_{\text{gas}}}{d_{\text{flüssig}}} \tag{3.8}$$

$$V_{\text{flüssig}} = V_{\text{gas}} \cdot \frac{d_{\text{gas}}}{d_{\text{flüssig}}} \tag{3.9}$$

wobei:

- $\dot{V}_{\text{gas}}, \dot{V}_{\text{flüssig}}$ = Volumenströme gasförmig/flüssig [m³/s]
- $V_{\text{gas}}, V_{\text{flüssig}}$ = Volumen gasförmig/flüssig [m³]

- $d_{\text{gas}}, d_{\text{flüssig}}$ = Dichten gasförmig/flüssig [kg/m³]

3.6.3 Vakuum-Druckmessung mit MPT-200 und PPT-200

[3] Der MPT-200 ist eine fertige Messeinheit mit zwei Sensoren und Messelektronik von Pfeiffer VAKUUM. Für Vakuumdrücke im Bereich von $300\,\text{mbar}$ bis $1 \cdot 10^{-4}\,\text{mbar}$ wird eine Pirani-Röhre benutzt. Die Pirani-Röhre misst die Wärmeleitfähigkeit des Gases, das im Vakuum verbleibt. Über den Zusammenhang zwischen Druck und Wärmeleitfähigkeit des Mediums kann der Druck berechnet werden. Der PPT-200 besitzt nur die Pirani-Röhre. Der zweite Sensor der MPT-200 ist eine Kaltkathode. In der Kaltkathode wird eine hohe Spannung zwischen Anode und Kathode angelegt. Es wird gemessen, wieviele Atome pro Sekunde ionisiert werden. Dabei dringen die Elektronen in die Anode ein und fließen zur Kathode. Dieser Strom wird gemessen und zu einem Druck umgerechnet. Die Ergebnisse der Druckmessung werden digital zur SPS übermittelt.

Der PPT-200 ist an der Vakuumseite der Scrollpumpe verbaut. Der PPT-200 ist vor dem epnv2, so dass der Druck beim Evakuieren des Moderatorkreislaufs gemessen werden kann. Die MPT-200 ist an der Anschlussseite des Moderatorplugs auf dem Vakuumrezipienten (Vakuumisolierung) angebracht.

[3] Dieser Abschnitt wurde teilweise aus der Bachelorarbeit des Autors [33] übernommen und angepasst.

4 Automatisierung des Moderatorkryostaten

Diese Kapitel enthält die Konzeptionierung, Umsetzung und Dokumentation der Automatisierung.

4.1 Das Automatisierungskonzept

Die Automatisierung ist konzeptionell in mehrere Prozesse unterteilt, die untereinander interagieren oder Teilprozesse eines übergeordneten Prozesses sind:

- Vakuumpumpen/Ventile - Steuerung (Pump)
  - Die Vakuumpumpen sollen von NICOS aus angeschaltet/abgeschaltet werden können und während des Betriebs eingeschaltet bleiben.
- Pumpen und Spülen (Pump and purge)
  - Pump and purge soll das Moderatorvolumen mittels der Scrollpumpe spülen, um Verunreinigungen aus dem Volumen zu pumpen.
- Vorbereitungsmodus (Prepare)
  - Prepare soll überprüfen, ob der Kryostat bereit für den Betrieb ist (prüft ob die pump-Funktion läuft) und anhand dieser Daten den Kryostaten betriebsbereit machen oder Fehlerberichte ausgeben sofern dies nicht möglich ist. Durch diese Funktion soll Pump and purge ausgeführt werden.
- Kühlmodus zu vollständigen Verflüssigung des Moderatorgases im Moderator (Standby-Modus)
  - Der Standby-Modus soll das Moderatorgas im Moderatorbehälter weitestgehend verflüssigen, ohne Teile des Gases zu erstarren. Hierzu soll die Funktion den Regelprozess mit einem Sollwert zwischen der Siedetemperatur und der Erstarrungstemperatur starten.

- Kühlen auf die Solltemperatur (Cooldown)
  - Der Cooldown soll das Moderatorgas im Moderatorvolumen auf die gewünschte Temperatur kühlen. Hierzu soll die Funktion den Regelprozess mit der gewünschten Temperatur als Sollwert starten.
- Regelprozess
  - In diesem Prozess ist der PID-Regler enthalten, welcher den $\mathrm{MFC_{He}}$ und den Transferheber steuert.
- Notfallabschaltung (Emergencyshutdown)
  - Der Prozess soll im Notfall das System schnellstmöglich ausschalten und in einen sicheren Zustand bringen.
- Normale Abschaltung (Shutdown)
  - Der Regelprozess soll beendet werden und der Kryostat soll sich langsam von selbst aufwärmen.
- Prozess-Überwachungsmodul mit Notabschaltfunktion
  - Der Prozess soll konstant laufen und den Kryostaten überwachen. Bei kritischen Versagen von Bauteilen oder der Steuerung soll die Emergencyshutdown Funktion aktiviert werden.
- Automatische Kühlung (Auto-cooldown)
  - Mit dieser Funktion soll der gesamte Kühlprozess von der Initialisierung bis zum Erreichen und Halten der Solltemperatur vollautomatisch mit einem Klick ausgeführt werden. Zu diesem Zweck sollen die Funktionen Prepare, Standby und Cooldown verwendet werden. Bei dem Stoppen der Funktion soll die Shutdown-Funktion gestartet werden.

4.1.1 Das Regelungskonzept

Die Temperatur des Moderatorgases innerhalb des Moderatorbehälters kann durch den Kühlgasdurchfluss und die Heizungen des Lakeshore-Tieftemperaturreglers beeinflusst werden. Für die Regelung der Temperatur war im manuellen Betrieb die Nutzung

des Lakeshore-Tieftemperaturreglers vorgesehen. Die Regelung soll hier aber nur über die Kühlleistung laufen. Diese Entscheidung beruht darauf, dass die Heizungen des Lakeshore-Tieftemperaturreglers direkt an den Messsensoren des Lakeshore-Tieftemperaturreglers liegen (s. Abb.**4**-1) und somit lokale Hotspots gemessen werden könnten (s. Kap. 7.2.2 für die späteren Simulationsergebnis zur Wärmeleitung). Zusätzlich wird der Wärmeeintrag über die Heizungen eingespart.

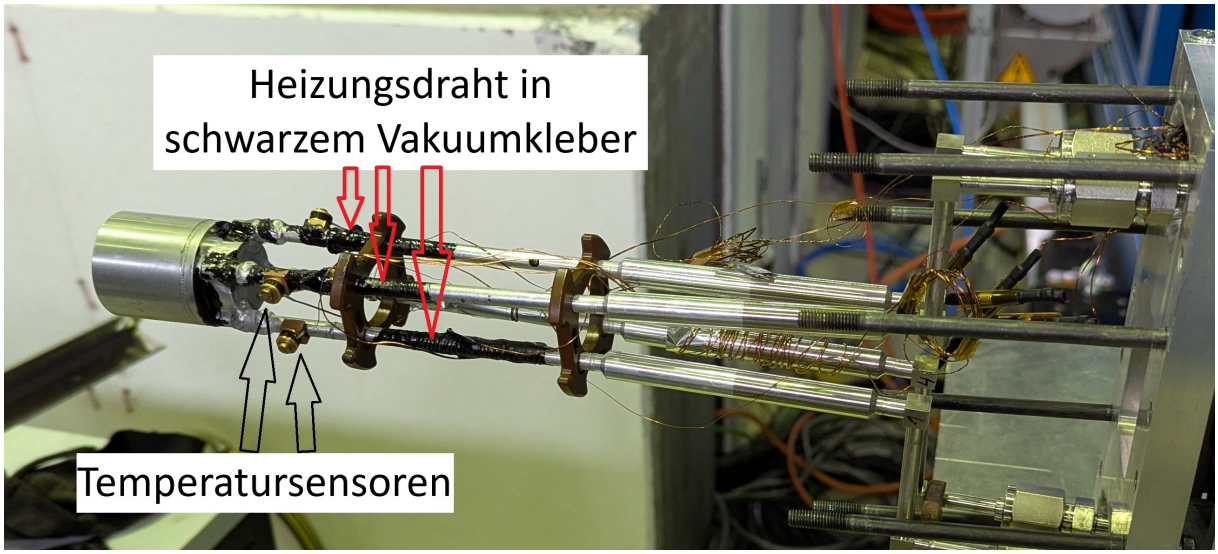


Abbildung **4**-1: Moderatorgeometrie mit Sensorik und Heizungen im geöffneten Moderatorplug

Der Durchfluss des Kühlmittels durch den Kryostaten kann über 3 Parameter verändert werden.

- Druck auf der Gasphase im Kühlmittel-Dewar (ab $\sim 0{,}55$ bar öffnen Überdruck-Ventile auf unseren Dewar-Behältern)
- Öffnung des Nadelventiles im Transferheber
- Setpoint des $\mathrm{MFC_{He}}$

Beim Absenken des Drucks wird der flexible Schlauch, welcher den Kühlmittel-Dewar mit dem GMP verbindet, durch das aus dem Dewar ausströmende Kühlgas gekühlt. Bei plötzlichem Druckabfall wird der Schlauch erheblich gekühlt und friert ein. Dabei verliert er seine Elastizität und kann spröde werden und zerbrechen. Außerdem hängt die Zeit bis zum Erreichen des gewünschten Solldrucks vom Füllstand des Dewars ab: Je niedriger der Füllstand ist, desto größer ist die Gasphase über der Flüssigkeit. Dadurch verändert sich das Druckverhalten: Der maximale Durchfluss ist durch das Druckgefälle und den Leitungsdurchmesser gegeben. Diese bleiben konstant. Das benötigte Gasvolumen für das Verändern des Drucks ändert sich aber mit dem Füllstand

des Dewar. Deshalb wurde entschieden, den Druck konstant zu halten und dafür einen I-Regler zu entwerfen.

Aus ersten Versuchen mit Ethan und flüssigem Stickstoff ging hervor, dass sich das Verhalten des Transferhebers stark beim Einkühlen des Systems verändert. Der Grund dafür kann die Längenkontraktion der Nadel beim Einkühlen sein. Der MFC_{He} liegt hinter der Heizung zum Wiederaufwärmen des Kühlmittels und hat dieses Problem nicht. Daher wird ein PID-Regler, welcher den MFC_{He}-Setpoint steuert entworfen.

Als Regelgröße wird die Temperatur im Moderatorbehälter definiert. Hierfür soll der bestmögliche Temperatursensor als Regelwert gewählt werden. Der Regler soll für Methan $10\,\mathrm{K}$ ausgelegt werden.

4.2 Umsetzung des Automatisierungskonzeptes

Die Automatisierung arbeitet mit einem internen Status System. Die Status-Flags sind hier mit dem Wert nach einem Neustart des Systems aufgeführt.

- `_pressurized=False`
- `_prepared=False`
- `_low_temp=False`
- `_check_heater=False`
- `_emergency=False`

Zudem sind pnv8 und epnv2 gegeneinander in der SPS verriegelt[1], um die Turbopumpe vor Druckschlägen zu schützen.

4.2.1 Vakuumpumpen/Ventile - Steuerung (Pump)

Der Prozess wird mit `Cryostat.pump(True)` eingeschaltet. Der gestartete Thread prüft ob die Vakuumpumpen an und die Ventile auf sind. Falls dies nicht der Fall ist, schaltet der Thread die Vakuumpumpen an und öffnet die Ventile „epnv1“ und „epnv2“. Dies wird für „epnv2“ ignoriert, solange die Funktionen Pump_and_purge oder Shutdown parallel laufen. Zudem wird die Benutzerinteraktion mit diesen Geräten blockiert solange der Thread läuft. Dies soll ungewünschtes Schließen oder Abschalten während des

[1] Solange eines der Ventile offen ist, kann das andere nicht geöffnet werden

Betriebs verhindern, weil das bei dem Moderatorkryostaten zu Beschädigungen führen kann. Während die Regelung zum Kühlen aktiviert ist, kann der Thread nicht beendet werden. (In Notfällen kann das System mit `_Restart()` resettet werden) Die Funktion kann mit `Cryostat.pump(False))` deaktiviert werden.

4.2.2 Pump and purge

Die Funktion Pump and purge spült das Moderatorvolumen, um Verunreinigungen mittels der Scrollpumpe aus dem Volumen zu pumpen. Die Funktion kann manuell mit `cryostat.pump_and_purge(self, iterations=1)` ausgeführt werden.

- Prüft und bricht ab wenn PID Controller oder Shutdown (s. 4.2.6) Funktion laufen.
- Startet _pump_and_purge Thread und übergibt `iterations` Parameter
  - Schließt pv1-6
  - Schließt epnv2
  - Öffnet pv8
  - Wartet auf ≤ 5 mbar Druck bei pt1
  - Schließt pv8
  - Öffnet pv1
  - Setzt den setpoint vom MFC_{CH_4} auf 100%
  - Wartet 15 Sekunden
  - Nach 3 oder mehr Durchläufen wird der Status `_pressurized=True` gesetzt
  - Wiederholt den Vorgang für die angegebene Anzahl an `iterations`

4.2.3 Prepare

Die Funktion Prepare bereitet den Kryostaten auf den Betriebsstart vor. Sie kann mit `cryostat.prepare(self)` ausgeführt werden. Die Funktion wird als Thread ausgeführt. Es werden wichtige Parameter überprüft, um die Funktion der Automatisierung zu gewährleisten.

- Abbruchkriterium: Vakuumdruck ist über $5 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{mbar}$
- Abbruchkriterium: Überprüft ob der Transferheber referenziert ist und startet die Referenzierung falls dieser nicht referenziert war. Abbruch bei fehlerhafter Referenzierung.

- Starten Pump_and_purge mit 3 Iterationen, wenn der status `_pressurized=False` gesetzt ist.
- Abbruchkriterium: Überprüft die Differenz zwischen pt1 und p2 und bricht bei mehr als $0{,}1\,\mathrm{bar}$ ab, weil das ein Indiz für eine eingefrorene Leitung ist.
- Setzt PC_{He} Sollwert auf $0{,}5\,\mathrm{bar_{rel}}$ und startet die Druckregelung.
- Abbruchkriterium: Überprüft den Druck von pt4 (Gasversorgung für Druckregelung des Dewar). Unter $0{,}3\,\mathrm{bar}$ wird abgebrochen
- Abbruchkriterium: Überprüft die Status-Flags `Scrollpumpe='high rpm'`, `Turbo-pumpe='high rpm'`, `epnv1='open'` und `epnv2='open'` und bricht bei abweichendem Status ab.
- Setzt `_prepared=True`

4.2.4 Standby

Die Funktion Standby kühlt das Moderatorgas bis knapp unter die Siedetemperatur und hält die Temperatur, um das gesamte Moderatorgas im Moderatorbehälter zu verflüssigen. Die Funktion kann mit `cryostat.standby(self)` ausgeführt werden. Die Funktion nimmt sich die Daten für den Siedepunkt aus der Datenbank, die für die Moderatorgase hinterlegt ist. Dann startet die Funktion den Temperaturregler mit der Solltemperatur = Siedepunkt - ($3\,\mathrm{K}$ bis $10\,\mathrm{K}$).

- Holt sich die Siedetemperatur aus der Datenbank für das in MFC_{CH_4} eingestellte Moderatorgas und den Erstarrungspunkt.
- Ermittelt den Offset-Wert (Siedetemperatur >$99\,\mathrm{K}$ => $10\,\mathrm{K}$ Offset, $>49\,\mathrm{K}$ => $5\,\mathrm{K}$ Offset oder $3\,\mathrm{K}$ Offset)
- Berechnung der Solltemperatur = Maximum aus (Siedepunkt - Offset, Erstarrungspunkt + Offset, 8) (Verhindert eine Solltemperatur von unter $8\,\mathrm{K}$ durch falsche Eingabe und eine Solltemperatur unter dem Erstarrungspunkt)
- Abbruchkriterium: Wenn die Temperatur im Moderatorbehälter mehr als $15\,\mathrm{K}$ unter der Solltemperatur liegt -> Funktion kann nicht fälschlicherweise zum Aufwärmen verwendet werden
- Abbruchkriterium: Wenn die berechnete Solltemperatur über der des Siedepunktes liegt (verhindert versehentliche falsche Angabe von Siede- oder Erstarrungspunkt in Datenbank)
- Gibt eingestelltes Moderatorgas, Siedetemperatur und Solltemperatur aus
- Startet Cooldown-Funktion mit Solltemperatur

4.2.5 Cooldown

Die Funktion Cooldown überprüft ob der Kryostat in einem betriebsbereiten Zustand ist. Kann mit `cryostat.cooldown(self,target)` ausgeführt werden. Die Funktion startet danach den Regler mit der Solltemperatur(target), welcher dieser Funktion gegeben wird.

- Schaltet die Check Heater Funktion (Funktion, die die Kühlmittelheizung am GMP über 200K Kryostattemperatur ausschaltet) aus.
- Bricht ab, wenn der Status `_prepared=False` gesetzt ist.
- Prüft, ob ein Fehler aus der Check Limits Funktion kommt und startet, falls dies nicht der Fall ist, den PID Controller mit der Solltemperatur. Schaltet die Heizung am GMP an und fixiert[2] sie.

4.2.6 Shutdown

Die Funktion Shutdown beendet den Betrieb des Kryostaten und lässt den Kryostaten, ohne das elektrische Aufheizen der Moderatorgeometrie, wieder aufwärmen. Kann mit `cryostat.cryo_shutdown(self)` ausgeführt werden oder mit dem Drücken des „Stop“ Knopfes der Kryostatensteuerung. Die Funktion kann nicht unterbrochen werden, außer durch die Emergencyshutdown Funktion.

- Beendet den PID Controller.
- Startet einen _shutdown Thread, nach der Überprüfung, ob bereits ein _shutdown Thread aktiv ist:
  - Liest den Erstarrungspunkt vom Moderatorgas, welches im MFC_{CH_4} eingestellt ist, aus
  - Setzt die Solltemperatur (setpoint) der Heizung des Lakeshore-Temperaturcontroller auf den Erstarrungspunkt des Moderatorgases
  - Schließt den Transferheber
  - Setzt den MFC_{He} auf $100\,\%$
  - Schließt die Pneumatikventile pnv1 bis pnv8
  - Wartet bis die Temperatur im Moderatorbehälter über $250\,\mathrm{K}$ angestiegen ist
  - Schließt MFC_{He}
  - Setzt `_prepared=False`

[2] verhindert die Interaktion vom Benutzer mit dem fixierten Gerät

  - Setzt `_pressurized=False`
  - Gibt „shutdown complete“ aus

4.2.7 Emergencyshutdown

Die Funktion Emergencyshutdown beendet den Betrieb des Kryostaten und evakuiert sofort das Moderatorgas aus dem Kryostaten und heizt die Moderatorgeometrie auf $250\,\mathrm{K}$. Sie kann mit `cryostat.emergency_shutdown(self)` ausgeführt werden. Die Funktion kann nicht unterbrochen werden. Die Funktion schließt alle Ventile, sodass kein Moderatorgas oder Kühlgas in den Kryostaten fließen kann. Dann fängt sie an den Moderatorkryostaten mit der Lakeshore-Tieftemperaturregler-Heizung aufzuheizen und das Helium und Moderaortrgas im Moderatorkryostaten abzulassen. Dann wird der Moderatorkreislauf mit der Scrollpumpe evakuiert. Über $250\,\mathrm{K}$ Kryostattemperatur werden alle noch offenen Ventile geschlossen und die Heizung abgeschaltet.

- Beendet alle Threads außer pump (s. 4.2.1).
- Startet einen _emergency_shutdown Thread:
  - Schließt die Pneumatikventile pnv1 bis pnv8
  - Schließt den Transferheber
  - Macht die Heizung am GMP an und fixiert diese.
  - Setzt die Solltemperatur der Heizung des Lakeshore-Temperaturcontrollers auf $250\,\mathrm{K}$ und die Heater-Range (Einstellung des Lakeshore-Tieftemperaturreglers) auf „high“
  - Setzt den $\mathrm{MFC_{He}}$ auf $100\,\%$
  - Öffnet pnv3 für 10 Sekunden
  - Schließt epnv2
  - Öffnet pnv8
  - Wartet $30\,\mathrm{s}$
  - Wartet bis $250\,\mathrm{K}$ im Moderatorbehälter erreicht sind
  - Schließt pnv8
  - Öffnet epnv2
  - Schaltet die Heizung am GMP aus
  - Schließt $\mathrm{MFC_{He}}$
  - Gibt „emergency shutdown completed“ aus
  - Setzt `_prepared=False`
  - Setzt `_pressurized=False`

4.2.8 Auto-Cooldown

Die Funktion Auto-Cooldown wird als Thread durch die Hilfsfunktion doStart gestartet. Die Funktion kann unter cryostat mit dem „Start“-Knopf gestartet werden. Dort wird auch die Solltemperatur eingeben. Die Auto-Cooldown Funktion benutzt die anderen vorher genannten Funktionen, um mit einem Klick auf den Start-Knopf den Moderatorkryostaten ohne weitere Eingaben zur Solltemperatur zu steuern.

Der Dewar und die Gasflaschen müssen im Vorhinein angeschlossen sein. Die Vakuumpumpen müssen laufen, damit der Druck im Vakuum niedrig genug für den Start des Moderatorkryostaten ist und bleibt. Der Moderatorkryostat kann dann nach Eingabe der Art des Moderatorgases, der Art des Kühlgases und der gewünschten Solltemperatur selbständig die Solltemperatur erreichen und bis zur Abschaltung (oder bis zu wenig flüssiges Kühlgas im Dewar ist) halten.

- Prüft, ob bereits eine Instanz vom PID Controller läuft und startet die Hilfsfunktion „updating setpoint“ (Diese Funktion ändert die Solltemperatur des Reglers im Betrieb), falls eine Instanz läuft.
- Überprüft ob eine Instanz von Prepare, Pump and purge oder Shutdown läuft und bricht mit Error „cannot start cooldown cryostat during current operation“ ab
- Startet den Thread _auto_cooldown mit der Solltemperatur aus dem Eingabefenster
  - Prüft, ob die `_prepared=True` gesetzt ist. Ist `_prepared=False` wird die Prepare Funktion gestartet und bis zum Ende dieser abgewartet.
  - Liest den Siede- und Erstarrungspunkt des in MFC_{CH_4} eingestellten Gases aus
  - Ermittelt den Offset = Siedetemperatur über $99\,\mathrm{K}$ = $10\,\mathrm{K}$ Offset, $>49\,\mathrm{K}$ = $5\,\mathrm{K}$ Offset oder $3\,\mathrm{K}$ Offset
  - Berechnet die Solltemperatur = Maximum aus (Siedepunkt - Offset, Erstarrungspunkt + Offset, 8) (Verhindert eine Solltemperatur von unter $8\,\mathrm{K}$ durch falsche Eingabe und eine Solltemperatur unter dem Erstarrungspunkt)
  - Wenn die Temperatur im Moderatorbehälter mehr als $15\,\mathrm{K}$ unter der Solltemperatur liegt oder das eingestellte Gas H_2 ist, wird die Standby Funktion übersprungen. Ist die Temperatur im Moderatorbehälter weniger als $15\,\mathrm{K}$ unter der Solltemperatur von der Standby Funktion, wird die Standby Funktion gestartet und abgewartet, bis die Funktion ihre Solltemperatur erreicht und der Druck von pt1 und pt2 über $0{,}5\,\mathrm{bar_{rel}}$ liegt.
  - Danach wird die Cooldown Funktion mit der am Anfang eingegebenen Soll-

temperatur gestartet

Damit macht die Funktion Auto-Cooldown:

- Durch Prepare wird der Zustand des Kryostaten überprüft. (Wird übersprungen, wenn vorher manuell ausgeführt)
- Der Moderatorgaskreislauf wird 3 mal mit der Pump and purge Funktion gespült und dann unter Druck gesetzt (Wird übersprungen, wenn vorher manuell ausgeführt)
- Standby wird ausgeführt und verflüssigt einen großen Anteil des Moderatorgases im Moderatorbehälter (Wird übersprungen, wenn die Temperatur im Moderatorbehälter kalt genug ist)
- Cooldown wird gestartet und regelt das System zu der eingebenen Solltemperatur und hält die Temperatur dort

4.2.9 Zusätzliche Überwachungsfunktionen und Sicherheit

Die Funktion doStatus überwacht permanent, welche Threads laufen und zeigt dies für die Funktionen Pump, PID Controller, Check_Heater, Pump and purge, Prepare und Shutdown an. Startet die _check_adev_limits Funktion. Zusätzlich wird durch die Funktion „initialised“ oder „pressurized“ auf dem Bildschirm angezeigt, wenn die Statusflags `_prepared=True` oder `_pressurized=True` gesetzt sind.

Warnungen

Die Funktion _check_adev_limits prüft, ob Messwerte die eingestellten Schwellenwerte unter- oder überschreiten.

Die Funktion _pid_check wird periodisch durch den PID Controller Thread ausgeführt. Sie überprüft, dass pnv1 und pnv7 während des Betriebs des Kryostaten geöffnet und fixed[3] sind. Zudem besitzt sie die in 4.2.9 beschriebene und weitere Funktionen für den Regler.

- Wenn der Druck von pt1 oder pt2 über $1{,}2\,\mathrm{bar_{rel}}$ ist, wird eine Warnung ausgeben, dass über die Überdruckventile ab $1{,}3\,\mathrm{bar_{rel}}$ abgeblasen wird

[3] verhindert die Interaktion vom Benutzer mit dem fixierten Gerät

- Wenn der Druck von pt1 oder pt2 unter $0{,}2\,\mathrm{bar_{rel}}$ ist, wird eine Warnung vor niedrigem Druck im Moderatorkreislauf ausgegeben
- Wenn der Druck von pt1 oder pt2 über $2\,\mathrm{bar_{rel}}$ ist, wird eine Überdruckwarnung ausgegeben und die Ventile pnv1, pnv2 und pnv3 geschlossen. Dies wird auch im Status des Kryostaten angezeigt.
- Warnung vor zu hohem Druck, wenn der Vakuumdruck hinter der Scrollpumpe über 1mbar ist (Ausgeschaltet wegen Sensorproblem mit PPT-200 im Zusammenhang mit Messmethode und Wasserstoff/Methan Wärmeleitfähigkeit)
- Warnung vor niedrigem Druck auf der Zuleitung, welche von der Kühlmittelgasflasche kommt, wenn der Druck an pt4 unter $1\,\mathrm{bar_{rel}}$ fällt (Schützt vor unbemerktem Druckabfall, da die Gasflasche sich im Betrieb sehr schnell leert)
- Warnung vor niedrigem Druck auf der Druckluftleitung, wenn pt_input unter $4\,\mathrm{bar_{rel}}$ fällt. Die Automatisierung schaltet ab. `_prepared=False` gesetzt. (Ohne Pneumatikdruck funktioniert kein Ventil und alle Ventile sind im Grundzustand geschlossen. Muss von Benutzer direkt vor Ort behoben werden.)
- gibt alle Warnungen oder OK an doStatus Funktion

Menschliche Fehler

Der Kryostat hat in einigen Funktionen (s. 4.2.4, 4.2.3) Befehle, die menschliche Fehler, wie das falsche Eingeben von Werten oder dem fehlerhaften Benutzen des Moderatorkryostaten abfangen und so den Kryostaten vor fehlerhaftem Gebrauch schützen.

Schutz vor Vakuumeinbruch

Im PID Controller Thread wird die Funktion _pid_check mit einem Befehl ausgeführt, der den Vakuumdruck überprüft. Wenn der Vakuumdruck über $1 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{mbar}$ steigt, wird der Emergencyshutdown (4.2.7) ausgelöst, um weiteren Schaden am Kryostaten zu reduzieren oder sogar ganz zu verhindern. So kann, auch bei Abwesenheit des Benutzers, kein Folgeschaden durch fortlaufenden Betrieb entstehen.

Schutz vor Implosionen und Blasenbildung im Methan/Moderatorgas-Kristall

Zur Sicherheit der Benutzer und des Kryostaten wird in der Prepare-Funktion (s. Abschnitt 4.2.3) überprüft, ob der Moderatorbehälter zugefroren ist. Dies wird geprüft,

indem der Druckunterschied zwischen pt1 und pt2 gemessen wird.

Bei einem Start des Kryostaten mit eingefrorenem Moderatorgas entsteht ein Risiko der Kavitätsbildung[4] im Kristall. Im normalen Betrieb wird dies durch die Standby-Funktion weitestgehend verhindert, indem das Moderatorvolumen zu einem großen Anteil mit flüssiger Phase gefüllt wird, sodass sich beim Erstarren möglichst wenige Gasblasen bilden.

Die Automatisierung kann beim erneuten Starten der Kühlfunktion, wenn die Anschlüsse des Moderatorbehälters zugefroren sind, nicht erfassen, in welchem Stoffzustand sich das Innere des Moderatorbehälters befindet. Beim Start in diesem unbekannten Zustand kann es passieren, dass das Moderatorgas im Moderatorbehälter ungleichmäßig erstarrt und leerer Raum im festen Moderatorgas entsteht. Das verschlechtert die Moderation der Neutronen und könnte den Kryostaten starkem temperatur- und druckbedingten Materialstress aussetzen und zur Beschädigung des Kryostaten führen.

[4] Hohlraumbildung

5 Umsetzung und Erweiterung des Regelkonzeptes

In diesem Kapitel wird beschrieben,wi das Regelungskonzept in ein reales Regelsystem umgesetzt wird. Das Regelsystem wird mehrfach getestet, erweitert und verbessert.

5.1 Druckregelung mit PC_{He} und Buerkert-Nadelventil

Die Kontrolle des Drucks läuft über einen PI^2-Regler, welcher als Thread geöffnet wird. Dem PI^2-Regler wird ein Solldruck gegeben. Dieser Wert wird als PC_{He}-Sollwert weitergegeben. PC_{He} kontrolliert den Gaszufluss aus der Gasflasche. Der PI^2-Regler arbeitet mit dem Solldruck + $0{,}01\,\mathrm{bar}$ als Sollwert. Durch das System wird ein $0{,}01\,\mathrm{bar}$ breites Band erzeugt. Bei Unterschreiten wird vom PC_{He} zusätzliches Gas in das System eingelassen und bei Überschreiten wird Gas über das Buerkert Nadelventil abgelassen. Der PI^2-Regler regelt den Öffnungsgrad des Buerkert-Nadelventils.

Als Basis dient ein Standard-PI-Regler, dessen Stellgröße sich aus einem proportionalen Anteil K_P und einem integralen Anteil K_I zusammensetzt:

$$u_{\mathsf{PI}}(t) = K_P\, e(t) + K_I \int_0^t e(\tau)\,\mathrm{d}\tau, \tag{5.1}$$

wobei $e(t)$ die Regelabweichung zwischen Ist- und Solldruck bezeichnet. Anstatt diese Stellgröße $u_{\mathsf{PI}}(t)$ direkt als Öffnungsgrad des Ventils zu verwenden, wird sie vor der Ventilsteuerung ein weiteres Mal über die Zeit integriert:

$$u_{\mathsf{Ventil}}(t) = \int_0^t u_{\mathsf{PI}}(\tau)\,\mathrm{d}\tau = K_P \int_0^t e(\tau)\,\mathrm{d}\tau + K_I \int_0^t \int_0^\tau e(\tau')\,\mathrm{d}\tau'\,\mathrm{d}\tau. \tag{5.2}$$

Durch diese nachgeschaltete Integration wirkt der proportionale Anteil K_P effektiv wie ein einfacher Integrator und der integrale Anteil K_I wie ein doppelter Integrator – der Regler erhält damit das Verhalten eines PI^2-Reglers, ohne dass eine eigene Reglerklasse implementiert werden muss.

In dem Regelsystem wird nur der Druck gemessen und das gesamte Gasvolumen des Systems kann stark mit dem Füllstand des Dewar variieren. Daher kann der Gasvolumenzustrom in das System nicht bestimmt werden. Dieser wird durch das Produkt

aus dem Sieden des Kühlmittels, dem momentanen Kühlmittelmassestrom und dem Zufluss, welcher von der Gasflasche kommt, bestimmt. Durch diese Umstände hat das System einen großen Arbeitsbereich abzudecken. Es sollen Drucküberschwinger mit niedrigem Volumenstrom ohne Unterschwinger ausgeregelt werden können, aber auch Druckstöße mit hohem Volumenstrom möglichst schnell abgefangen werden, sodass die Überdruckventile des Dewar nicht öffnen.

Genau für diesen großen Arbeitsbereich ist das PI^2-Verhalten vorteilhaft: Der wie ein Integrator wirkende K_P-Anteil sorgt dafür, dass das Ventil bei kleinen Druckabweichungen zunächst nur langsam und mit einer sanften Anfangsrampe geöffnet wird, sodass das System anfangs nicht zu aggressiv auf kleine Druckänderungen reagiert und Unterschwinger vermieden werden. Der wie ein doppelter Integrator wirkende K_I-Anteil baut dagegen bei anhaltender oder wachsender Regelabweichung – etwa durch eine unbekannte, sprunghafte Änderung des Kühlgaszuflusses – eine zunehmend stärkere Korrektur auf und fängt so auch große Druckstöße zuverlässig ab. Durch die getrennte Wahl von K_P und K_I können somit das Anfangsverhalten (sanftes Ansprechen) und das Ausregelverhalten (kräftige Langzeitkorrektur bei Überschwingern) weitgehend unabhängig voneinander optimiert werden.

Mit dieser Implementierung kann ein PI^2-Regler mit erhöhter Reglerdynamik realisiert werden, ohne dass eine neue Reglerklasse implementiert werden muss. Stattdessen wird die bereits verfügbare Standard-PID-Reglerklasse aus NICOS genutzt, wobei der D-Anteil deaktiviert und der Reglerausgang integriert wird.

Eine zusätzliche Verbesserung ist, dass der Thread, indem der Regler läuft, das Buerkert-Nadelventil sofort schließt, wenn der Druck unter den vorgegebenen Solldruck sinkt. So wird das direkte Abblasen des Gases aus der Kühlmittelgasflasche verhindert. Unter dem Solldruck regelt der PC_{He} den Zufluss in das System, sodass der Druck auf den Solldruck steigt.

Der Solldruck sowie K_P und K_I sind während des Betriebs justierbar. Der Minimalwert ist auf $0\,\mathrm{bar_{rel}}$ festgelegt und der Maximalwert auf $0{,}5\,\mathrm{bar_{rel}}$. Über $0{,}5\,\mathrm{bar_{rel}}$ gehen die Überdruckventile der typisch verwendeten Dewar-Gefäße für flüssiges Helium oder flüssigen Stickstoff auf.

Aus den Stoffwerten geht hervor, dass ein höherer Druck drei wesentliche Vorteile bietet:

- Erstens erhöht der erhöhte Druck die Wärmeleitfähigkeit des Gases.
- Zweitens verschiebt der höhere Druck die Siedetemperatur zu höheren Werten

und erhöht damit die Wärmeleitfähigkeit in dem Temperaturbereich zwischen alter und neuer Siedetemperatur um ein Vielfaches.

- Drittens verstärkt ein höheres Druckgefälle über das Kryostateninnere die Kühlwirkung des Joule-Thomson-Effekts im kryogenen Bereich. Die Expansion des gasförmigen Heliums, die durch die Leitungswiderstände im Kryostaten und den damit verbundenen Druckabfall entsteht, führt zu der damit verbundenen Temperaturänderung.

Aus diesen Gründen ist es sinnvoll, den maximal möglichen Druck als Auslegungspunkt für die Regelung zu wählen.

Hinweis aus der Praxis: Die Überdruckventile des Dewars sollten vor dem Druckaufbau gründlich gereinigt werden, damit der nominelle Ablassdruck erreicht werden kann.

5.2 Temperaturregelung

Der Regler kann während des Betriebs die Solltemperatur aktualisiert bekommen. Es können P, I und D während des Betriebs justiert werden. Da der Moderatorkryostat aktuell noch keinen Sensor direkt an dem Moderatorbehälter hat, wird anstatt dessen der Temperatursensor am Ausgang der Kühlgasleitung aus der Moderatorgeometrie als Regelwert genommen. Diese Temperatur wird weiter als Kryostattemperatur bezeichnet.

5.2.1 Reglerauslegung und Validierung

Der Regler arbeitet für den kompletten Regelbereich mit einem PID-Regler, der den Durchflusszielwert des MFC_{He} anpasst. Im Vorhinein wurden mehrere Durchflusswerte ermittelt, bei denen Wärmeeintrag und Kühlleistung sich im Gleichgewicht befinden und durch diese Gleichgewichtspunkte[1] eine Funktion gelegt. Diese Funktion (s. Abb. **5**-1) wird über die Funktion _get_scaling_factor ausgerechnet und zurück gegeben.

Aus dem errechneten Skalierungsfaktor werden mit der Funktion $I_{\min} = -0{,}1 \cdot$Skalierungsfaktor und $I_{\max} = +0{,}1 \cdot$ Skalierungsfaktor Grenzen für den Integralanteil des Reglers definiert. Da der Regler bei $300\,\mathrm{K}$ startet, benötigt der I-Anteil Saturationsgrenzen. Ohne diese

[1] Damit sind Arbeitpunkte des Systems gemeint, bei denen Wärmeeintrag und Kühlleistung im Gleichgewicht stehen.

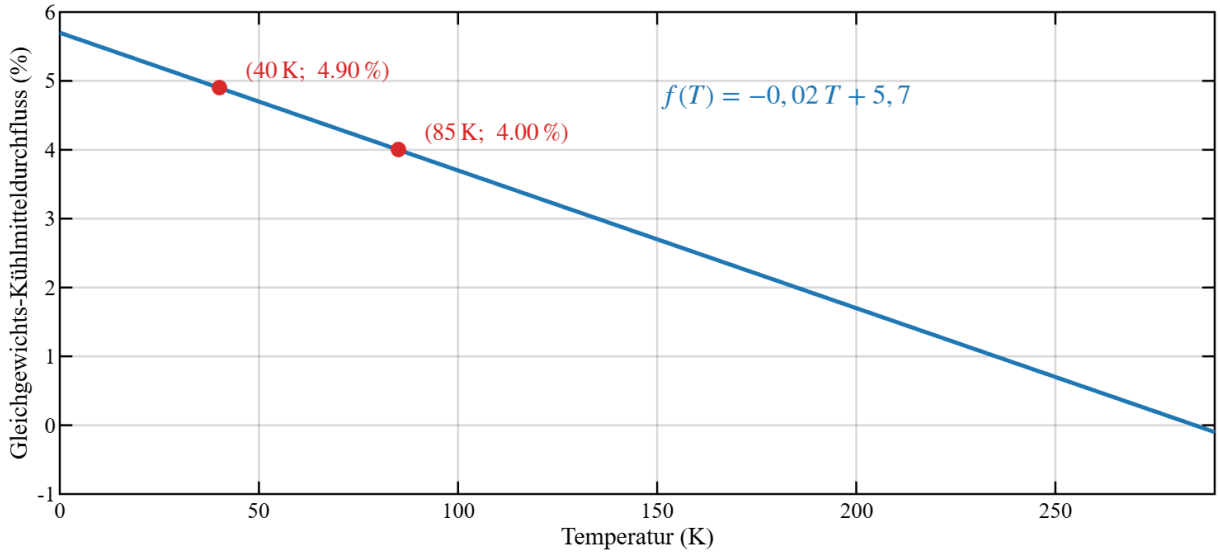


Abbildung **5**-1: Gleichgewichts-Kühlmitteldurchfluss als Funktion der Solltemperatur.

würde der Integralanteil unbegrenzt anwachsen (Integrator-Windup) und die Stellgröße dauerhaft auf $100\,\%$ festsetzen. Mit dieser initialen Version wurde die Regelung getestet (Ergebnis s. Abb.**5**-2).

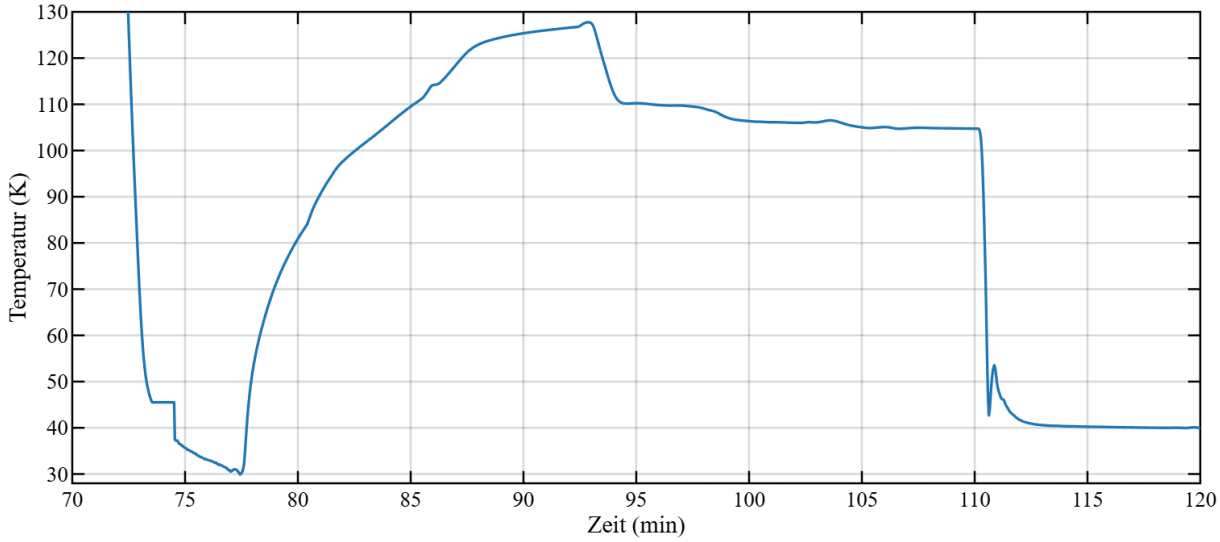


Abbildung **5**-2: Test-Messung: Temperatur am Kühlgas-Ausgang der Moderatorgeometrie (ganze Messung im Anhang)

In Abbildung **5**-2 ist ein Ausschnitt aus der ersten Messung, welche zum Testen der Automatisierung dienen sollte, zu sehen. Die Einkühlühase vor Minute 72 wurde weggeschnitten. Die Regelung startet ohne die volle Automatisierung zu nutzen. Zuerst wurde die normale Cooldown-Funktion (s. Kap. 4.2.5) mit einer Solltemperatur von $10\,\mathrm{K}$ von Minute 60 bis Minute 77 ohne die Standby-Funktion (s. Kap. 4.2.4) verwendet. Von Minute 77 bis 92 wurde die Kühlung abgeschaltet. Von Minute 94 bis 110 wurde die Standby-Funktion getestet. Nach Minute 110 wurde wieder zur Cooldown-Funktion mit einer Solltemperatur von $40\,\mathrm{K}$ gewechselt. Die Messung endet bei Minute 120.

Dieser manuell durchgeführte Test belegt, dass der Regler in Kombination mit der Standby-Funktion das Einkondensieren des Methans ermöglicht und mit der Cooldown-Funktion eine Solltemperatur von $40\,\mathrm{K}$ zuverlässig anfahren kann. Allerdings haben weitere Tests mit tieferen Solltemperaturen gezeigt, dass der Regler unter 35K nicht mehr brauchbar ist.

Beim Betrachten der Druck-Messwerte im Moderatorkreislauf (s. Abb. **5**-3, **5**-4) ist ein Problem aufgefallen: Der Druck an pt1 und pt2 fällt beim Kondensieren des Methans erheblich ab, da das Gas beim Phasenübergang in den flüssigen Zustand ein deutlich geringeres Volumen einnimmt und somit der Druck im Kreislauf sinkt. Der maximale Gasfluss durch MFC_{CH_4} reicht nicht aus um den Druckabfall auszugleichen. Dabei fällt der Druck bis auf ca. $0{,}01\,\mathrm{bar}$ absolut, was der unteren Messgrenze[2] der verwendeten Sensoren entspricht. Um das Eindringen von Fremdgasen durch kleine Lecks zu verhindern, sollte der Druck im Moderatorkreislauf den Atmosphärendruck nicht unterschreiten.

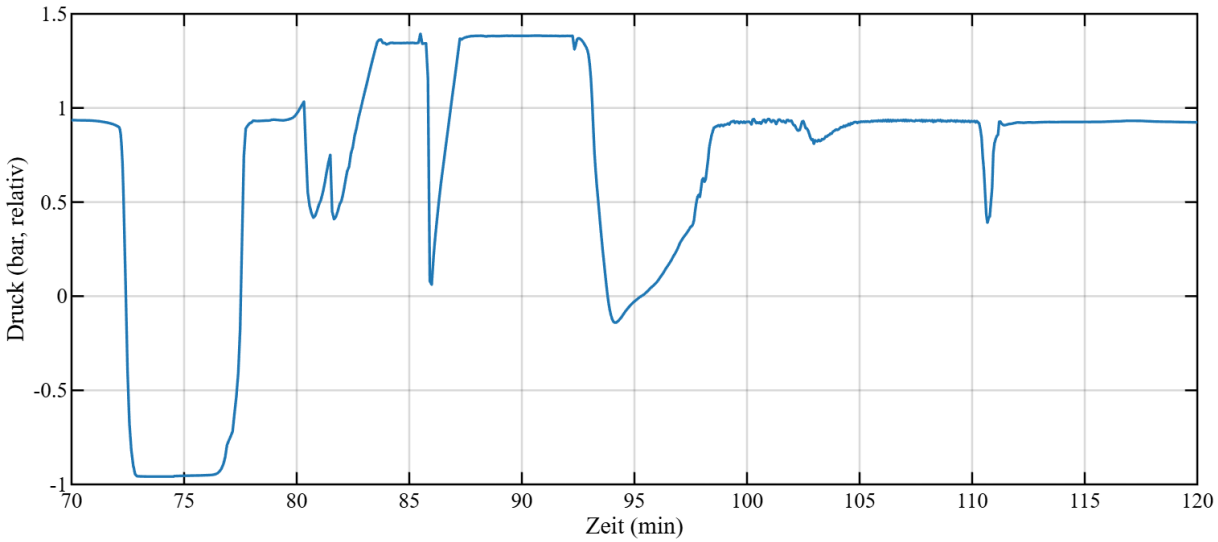


Abbildung **5**-3: Test-Messung: Drucksensor 1: Moderatorgaseingang (ganze Messung im Anhang)

[2]Da die Sensoren gegen Atmosphäre messen, verschiebt sich die Skala mit dem momentanen Druck der Atmophäre und haben bei verschiedenen Messungen unterschiedliche Minimalwerte

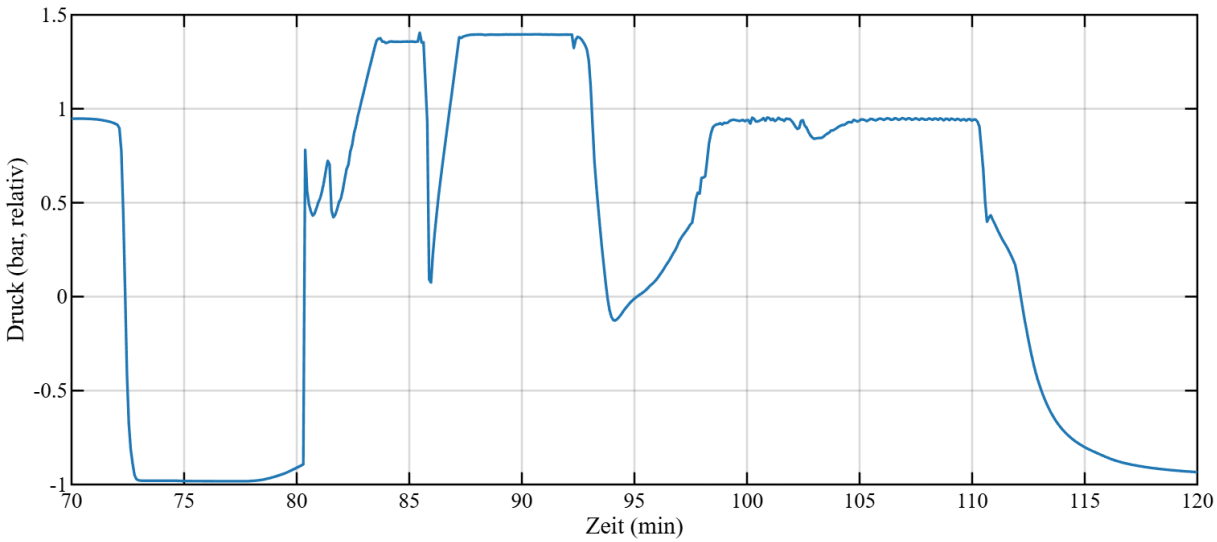


Abbildung **5**-4: Test-Messung: Drucksensor 2: Moderatorgasausgang (ganze Messung im Anhang)

Abb. **5**-3 und **5**-4 zeigt gegen Ende der Zeitskala das Verhalten der Sensoren beim einfrierendem und zugefrorenem Moderatorvolumen. Der Druck vom Moderatorausgang sinkt stark ab während der Druck am Moderatoreingang realtiv konstant bleibt. Dies geschieht durch die Trennung der Gasvolumina durch den nun innen mit Moderatorgas zugefrorenen Moderatorbehälter. Durch das weitere Einkondensieren des Moderatorgases sinkt der Druck in beiden Leitungen ab. Da über MFC_{CH_4} Moderatorgas in die Moderatorgaszuleitung nachfließt gleicht sich der Druckverlust auf der Moderatoreingangsseite aus. Bei Minute 81 sieht man das Auftauen und den plötzlichen Druckausgleich zwischen pt1 und pt2.

5.2.2 Erweiterung der Regelstruktur

Aus der Validierung können folgende Probleme abgeleitet werden:

- Der Druckabfall im Moderatorgaskreislauf während des Kondensierens muss geregelt werden
- Die Regelung muss im Temperaturbereich unter $35\,\mathrm{K}$ verbessert werden

Folgende Lösungen wurden implementiert:

- Der Öffnungsgrad des Nadelventiles im Transferheber ($U_{\text{Transferheber}}$)[3] wird nun mit

[3] Die Steuerspannung geht von $0\,\mathrm{V}$ für ein komplett geschlossenes Nadelventil bis zu $8\,\mathrm{V}$ für ein komplett geöffnetes

der druckabhängigen Funktion (s.Eq. 5.3 mit dem Drucksensor pt1 für p) gesteuert.

- Ein zweiter Regler wird für Solltemperaturen unter $35\,\mathrm{K}$ eingeführt.

Dämpfungsfunktion für die Einkondensation des Moderatorgases

Die Funktion 5.3 wurde durch die Stützpunkte in Abbildung **5**-5 gelegt. Da ein zu schnelles Einkondensieren des Moderatorgases den Druck im Moderatorkreislauf unter $1\,\mathrm{bar_{abs}}$ absenken kann, wurde die Funktion nach dem Prinzip einer Dämpfungsfunktion entworfen: Bei sinkendem Druck wird der Kühlmittelvolumenfluss reduziert, um die Kondensationsrate zu verringern und den Druck zu stabilisieren. Das Ziel der Funktion ist es den Druck im Moderatorkreislauf, nach einem initialen Unterschwinger, oberhalb von $1\,\mathrm{bar_{abs}}$ Druck zu halten. Da sich die Kondensationsrate im Kryostaten kontinuierlich ändert, kann kein stationärer Betriebspunkt erzeugt werden, an dem eine messtechnische Bestimmung der Stützpunkte möglich wäre. Die Stützpunkte wurden daher auf Basis physikalischer Überlegungen manuell festgelegt und müssen experimentell validiert werden.

Die Punkte wurden so ausgewählt, dass die Grenzen bei $1{,}5\,\mathrm{bar_{abs}}$ für volle Öffnung des Nadelventils und $0{,}5\,\mathrm{bar_{abs}}$ für ein geschlossenes Nadelventil sind. Zwischen $0{,}5\,\mathrm{bar_{abs}}$ und $1\,\mathrm{bar_{abs}}$ wurde eine hohe Punktdichte gewählt, um einen zunächst flachen Anstieg der Spannung mit einem geringen Öffnungsgrad des Nadelventils zu erzeugen. Oberhalb von $1\,\mathrm{V}$ bei $1\,\mathrm{bar_{abs}}$ nimmt die Steigung zu, sodass sich der Gleichgewichtspunkt zwischen dem Volumenverlust durch die Kondensation und dem nachströmenden Moderatorgas-Massenstrom möglichst knapp oberhalb von $1\,\mathrm{bar_{abs}}$ einstellt. Durch die Verteilung der Stützpunkte entfallen 7/8 der Skala von $U_{\text{Transferheber}}$ auf den Bereich oberhalb von $1\,\mathrm{bar_{abs}}$, wodurch der Gleichgewichtspunkt mit hoher Wahrscheinlichkeit in diesem Bereich liegt.

$$f(p) = 79.52p^6 - 416.13p^5 + 891.65p^4 - 995.24p^3 + 610.45p^2 - 194.14p + 24.898 \quad (5.3)$$

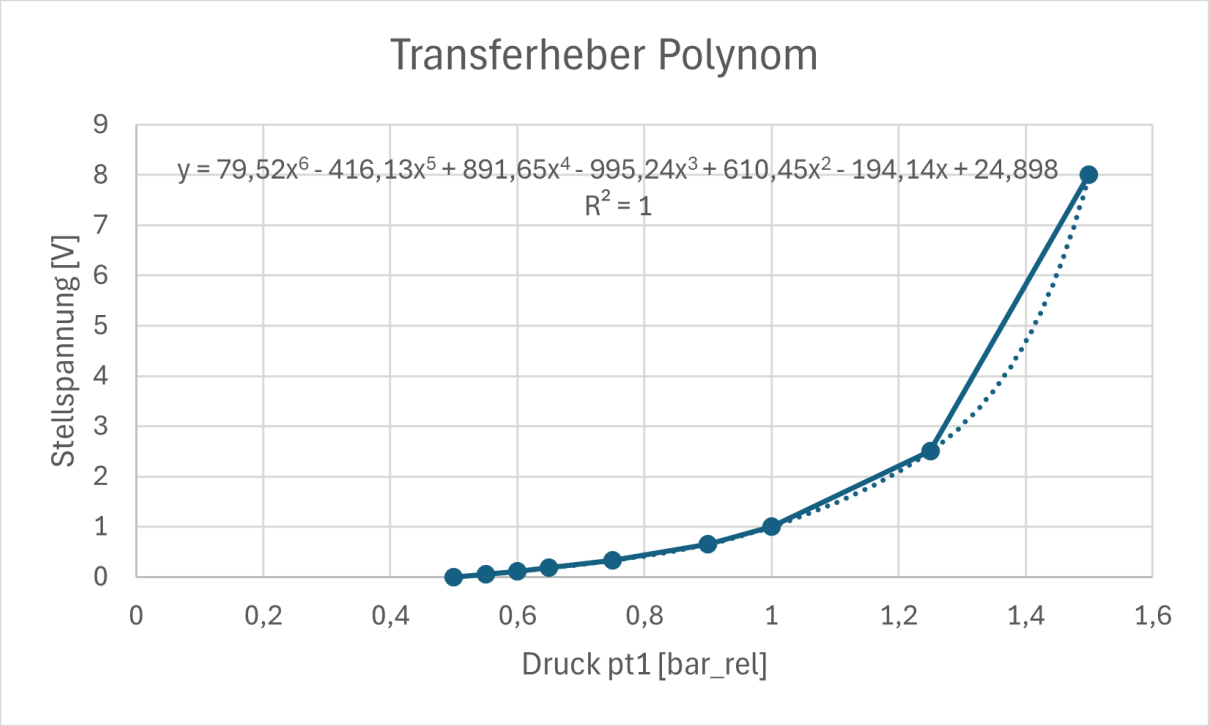


Abbildung **5**-5: Polynom 6.Grades um $U_{\text{Transferheber}}$ druckabhängig zu steuern

Das Polynom ist so einprogrammiert, dass es nur eine Gültigkeit zwischen $0{,}5\,\text{bar}_{\text{abs}}$ bis $1{,}5\,\text{bar}_{\text{abs}}$ hat. Unter $0{,}5\,\text{bar}_{\text{abs}}$ wird immer $0\,\text{V}$ ausgeben. Über $1{,}5\,\text{bar}_{\text{abs}}$ wird immer $8\,\text{V}$ ausgeben. Die druckabhängige Funktion begrenzt so den Durchfluss des Kühlmittels, sobald der Druck des Moderatorgases anfängt unter $1{,}5\,\text{bar}_{\text{abs}}$ zu sinken.

Tieftemperaturregler

Der zweite Regler für tiefe Temperaturen (Tieftemperaturregler) wird so implementiert, dass er und alle verbundenen Funktionen nur dann aktiviert sind, wenn die Solltemperatur unter $35\,\text{K}$ liegt. Der Tieftemperaturregler wird aktiviert, sobald die Kryostattemperatur unter $35\,\text{K}$ fällt. Um ein ständiges Wechseln der Regler zu verhindern wird nur bei einer Kryostattemperatur von über $45\,\text{K}$ (ursprünglich $40\,\text{K}$, nach der Messung vom 24.04.2026 erhöht auf $45\,\text{K}$) wieder zu dem normalen Regler gewechselt.

Der Regler bekommt einen festgelegten Skalierungfaktor von $15\,\%$. Die untere Saturationsgrenze wird fest auf $I_{\min} = -0{,}108$ festgelegt. $I_{\max}$ ist während des Betriebs justierbar und ist für den Betrieb auf $15\,\%$ gesetzt. $K_{P_{\text{lowtemp}}}$, $K_{I_{\text{lowtemp}}}$ und $K_{D_{\text{lowtemp}}}$ sind während des Betriebs justierbar.

5.2.3 Problembeschreibung und Hypothese

Bei der Kalibrierung des Tieftemperaturreglers erreichte die Kryostattemperatur mithilfe der Tieftemperaturregelung die Solltemperaturen. Dabei sind Temperaturoszillationen um die Solltemperatur aufgefallen. Die Amplitude dieser Oszillationen lag im Bereich von $2\,\mathrm{K}$ bis $3\,\mathrm{K}$ bei einer Solltemperatur von $15\,\mathrm{K}$.

Die vermutete Ursache dafür lautet wie folgt: Das flüssige Helium verdampft während des Transports zur oder in der Moderatorgeometrie an thermischen Hotspots (z.B. an den Berührungstellen der Spacer). An der Verdampfungsstelle entsteht eine Druckspitze. Unter der Annahme stationärer Bedingungen, was bei den Strömungsgeschwindigkeiten des flüssigen Heliums im Kryostaten realistisch ist, sind die Grenzen des Systems der MFC_{He} in Richtung Flussrichtung und der PC_{He} entgegen der Flussrichtung. Die Druckspitze, die durch das Verdampfen des Heliums entsteht, wird auf das gesamte Gasvolumen im System verteilt, sodass sich der Druck im System ausgleicht. Da das Gasvolumen in entgegengesetzter Strömungsrichtung (Leitungen des GMP und die Gasphase auf dem flüssigen Helium im Dewar) um ein Vielfaches größer ist, als das Gasvolumen in Strömungsrichtung, breitet sich das Gas in Richtung des Dewar aus und schiebt die flüssige Heliumphase, die hier wie ein Flüssigkeitspfropfen wirkt, entgegengesetzt der eigentlichen Strömungsrichtung. Die Strömung stagniert dadurch kurzzeitig oder kehrt sich sogar um. Daraufhin entsteht durch folgende Faktoren eine gedämpfte Schwingung, die sich auf eine stabile Amplitude einschwingt (Ein oszillatorischer Gleichgewichtszustand):

Das stagnierende Helium in den dünnen Leitungen wird durch Wärmeleitung von dem umgebenden Rohr aufgeheizt und verliert dadurch Kühlleistung (Faktor 1). Gleichzeitig verdampft das stagnierende flüssige Helium kontinuierlich in den Rohrleitungen, was die Rückkehr zur normalen Strömungsrichtung verzögert (Faktor 2). Dies führt dazu, dass die Kühlleistung an dem Bereich des thermischen Hotspot für eine Zeitdauer im Sekundenbereich reduziert bleibt. Dadurch wärmt sich der thermische Hotspot wieder auf und sobald die flüssige Phase wieder am thermischen Hotspot ankommt, löst dies den gleichen Verdampfungseffekt wieder aus. Während der Verdampfung wird kurzzeitig viel Energie vom thermischen Hotspot abgeführt, wodurch sich die Oszillations-Amplitude auf einen stabilen Wert einpendelt.

5.2.4 Erweiterung der Tieftemperatur-Regelstruktur

Um dem entgegenzuwirken, wird eine neue Funktion zum Tieftemperaturregler hinzugefügt. Während der Tieftemperaturregler aktiv ist, wird $U_{\text{Transferheber}}$ auf $1\,\mathrm{V}$ gesetzt. Dies soll den Massefluss durch das Nadelventil so begrenzen, dass an dem Ventil ein Druckabfall entsteht. Da jetzt der Druck auf der Kühlgasrückleitung kleiner ist und ein größerer Teil des flüssigen Heliums durch den Druckabfall sofort verdampft, sollte dies zu einer merklichen Verbesserung des Kühlverhaltens führen.

In der Abbildung **5**-6 kann die einwandfreie Funktion des Pump and purge-Funtkion zwischen $0{,}15\,\mathrm{h}$ und $0{,}2\,\mathrm{h}$ gesehen werden. Danach ist bei ca. $0{,}3\,\mathrm{h}$ zu sehen, wie die druckabhängige Steuerfunktion für $U_{\text{Transferheber}}$ gegen den Druckabfall arbeitet und der Druck nach kurzer Zeit wieder über $0\,\mathrm{bar_{rel}}$ steigt und während des weiteren Kondensierens des Moderatorgases bleibt. Um die $0{,}4\,\mathrm{h}$-Marke findet der Reglerwechsel zwischen normalem und Tieftemperaturregler mehrere Male statt. Dies kann besonders gut an $U_{\text{Transferheber}}$ gesehen werden, welche bei dem Wechsel durch den Tieftemperaturregler auf $1\,\mathrm{V}$ gesetzt wird.

In einem größeren Ausschnitt der Messung vom 20.04.2026 (s. Abb. **5**-7) ist das Verhalten der Regelung um $10\,\mathrm{K}$ zu sehen. Die Solltemperatur von $10\,\mathrm{K}$ wird erreicht und ohne Oszillationen gehalten. Damit ist das ursprüngliche Ziel, dass der Regler bei $10\,\mathrm{K}$ mit Methan funktioniert, erfüllt. Nach $2{,}2\,\mathrm{h}$ wurde die Solltemperatur erst auf $15\,\mathrm{K}$ und dann auf $20\,\mathrm{K}$ gesetzt. Wie in der Abbildung **5**-7 zu sehen, oszilliert die Temperatur bei einer Solltemperatur von$15\,\mathrm{K}$ mit einer Amplitude >$1\,\mathrm{K}$.

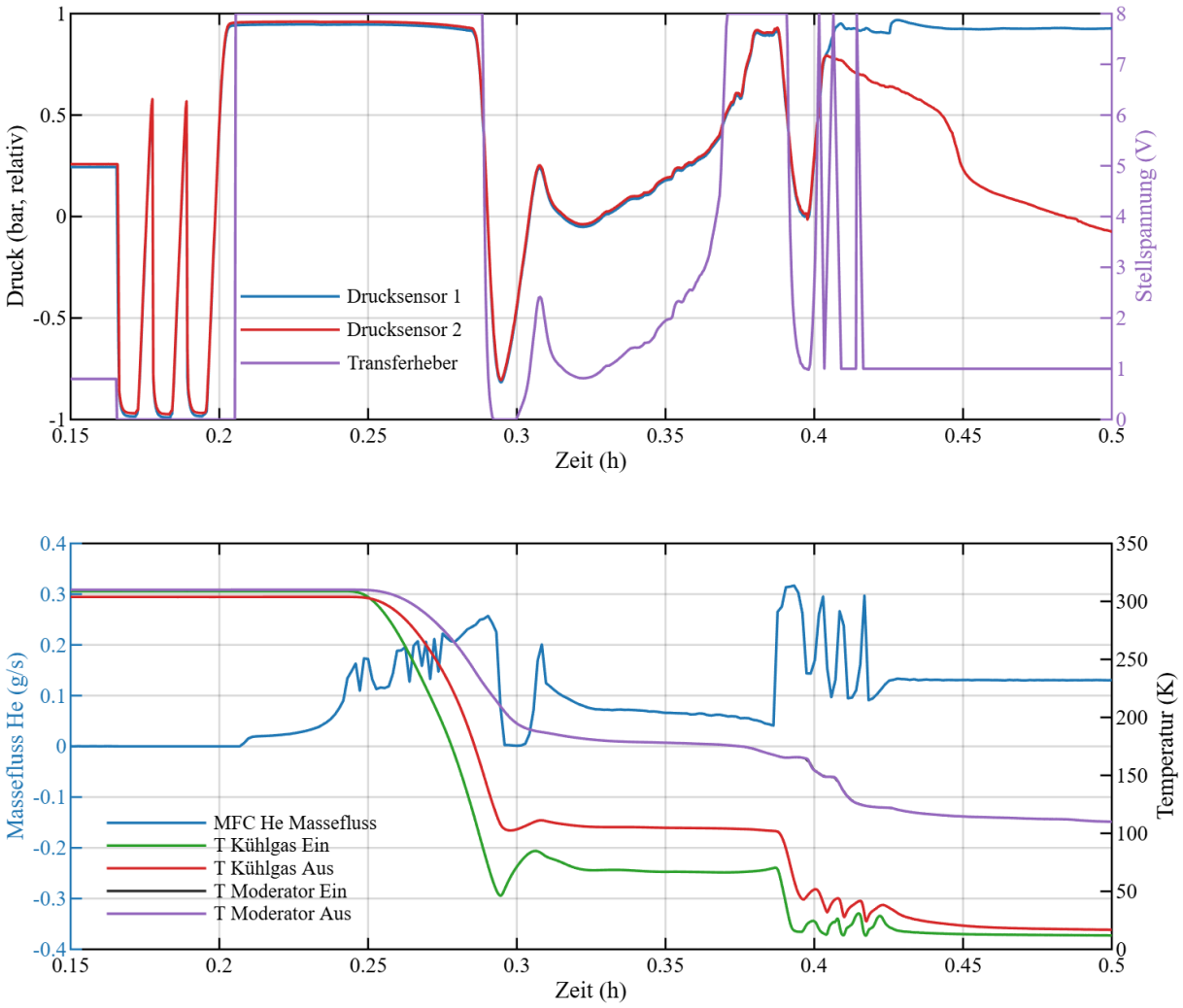


Abbildung **5**-6: Detailansicht der Methan-Messung vom 20.04.26 im Zeitbereich $t = 0{,}15$ bis $0{,}5$ h. Oben: Drucksensoren pt1 und pt2 (links) sowie Einstellspannung des Transferhebers (rechts). Unten: Helium-Massefluss des MFC_{He} (links) sowie die vier Temperatursensoren an Kühlgas-Eingang, Kühlgas-Ausgang, Moderator-Eingang und Moderator-Ausgang (rechts).

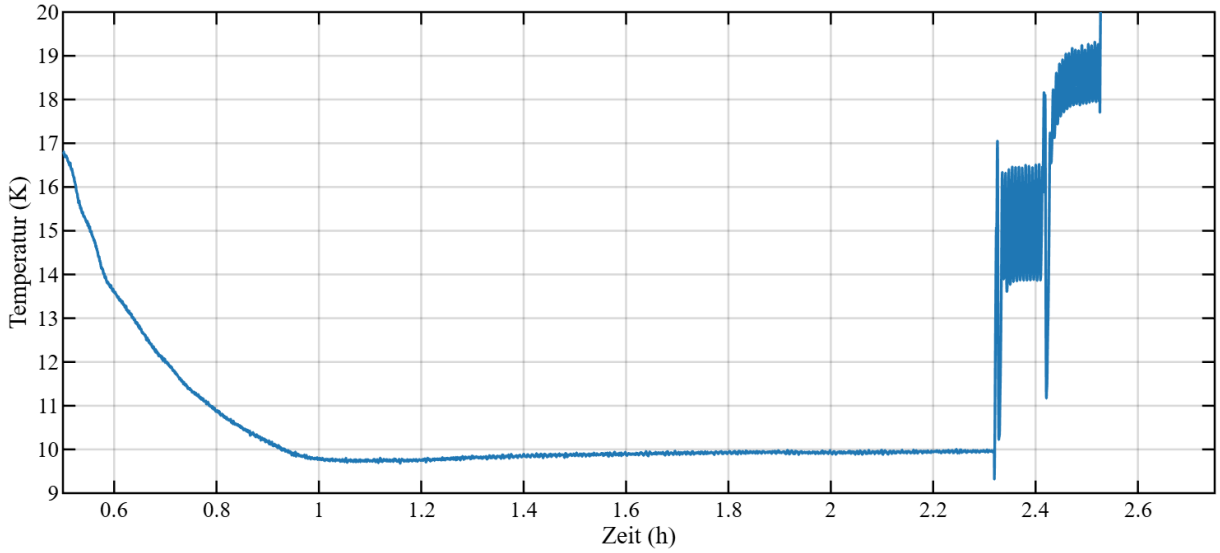


Abbildung **5**-7: Messung 20.04.2026: Kryostattemperatur

6 Optimierung der Betriebsparameter

In diesem Kapitel werden die Betriebsparameter optimiert. Die Optimierung des Betriebs des Kryostaten verfolgt zwei Hauptziele:

- Die Minimierung der Oszillationen um die Solltemperatur zwischen $10\,\mathrm{K}$ und $35\,\mathrm{K}$
- Die Minimierung der Zeit zum Erreichen der Solltemperatur

6.1 Erste Maßnahmen

Abbildung **5**-7 zeigt die Messung nach der Anpassung des Reglers. Bei $10\,\mathrm{K}$ sind keine Schwingungen mehr zu beobachten, und bei $15\,\mathrm{K}$ ist die Amplitude deutlich reduziert.

Unter der Annahme, dass die Erweiterung des Tieftemperaturreglers (s. Abschn. 5.2.4) aufgrund der erzielten Verbesserung des Regelverhaltens die korrekte Lösung für das Oszillationsproblem darstellt, lässt sich das Verhalten wie folgt beschreiben: Der Druckabfall am Transferheber-Nadelventil ist abhängig vom Verhältnis zwischen dem Massenstrom, den der $\mathrm{MFC_{He}}$ aus dem System ablässt, und $U_{\text{Transferheber}}$. Sinkt der Massenstrom, so steigt bei unveränderter $U_{\text{Transferheber}}$ der Druck in der Kühlgas-zu- und -rückleitung sowie in der Moderatorgeometrie. Dadurch verringert sich der Druckunterschied zwischen der Gasphase im Dewar und dem Helium im Moderator-Plug und das in Kapitel 5.2.3 beschriebene Oszillationsproblem tritt in abgeschwächter Form wieder auf. Aus diesem Grund wird der feste Wert von $1\,\mathrm{V}$ für die Steuerspannung des Transferhebers zu der Funktion $0{,}75 \times (35 - \text{Solltemperatur})/35 + 0{,}3$ umgewandelt. Oberhalb von $10\,\mathrm{K}$ Solltemperatur wird der Öffnungsgrad des Nadelventils durch die Funktion schrittweise reduziert ($0{,}835\,\mathrm{b}$ei $10\,\mathrm{K}$ bis $0{,}3\,\mathrm{b}$ei $35\,\mathrm{K}$).

Zusätzlich werden die Regelparameter temperaturabhängig verändert, um die Zeit zum Erreichen der Solltemperatur zu verringern. $K_{P_{\text{lowtemp}}}$, $K_{I_{\text{lowtemp}}}$ und $K_{D_{\text{lowtemp}}}$ sind die Regelparameter für den Tieftemperaturregler. Der proportionale Regelparameter K_P wird bei einem Abstand über $2\,\mathrm{K}$ von der Solltemperatur auf das Doppelte von $K_{P_{\text{lowtemp}}}$ gesetzt. Bei $2\,\mathrm{K}$ bis $0{,}5\,\mathrm{K}$ ist K_P gleich $K_{P_{\text{lowtemp}}}$ und unter $0{,}5\,\mathrm{K}$ wird K_P zu 0. K_I wird intern mit der quadratischen Funktion $((45 - \text{Solltemperatur})^2)/100 \cdot K_{I_{\text{lowtemp}}}$ errechnet. Damit sinkt K_I mit steigender Solltemperatur auf ähnliche Weise wie der erforderliche Gleichgewichts-Massenstrom. Der Helium-Massenstrom, der gebraucht wird, um das

Gleichgewicht zwischen Massenstrom und Wärmeeintrag zu erreichen, steigt bei Temperaturen nahe der Siedetemperatur des Heliums ähnlich wie eine quadratische Funktion an (s. Abb. **6**-2[1]). Die Funktion für K_I versucht das Verhalten nachzuahmen und so den K_I an den Gleichgewichts-Massenstrom anzupassen und das Einschwingverhalten zu verbessern.

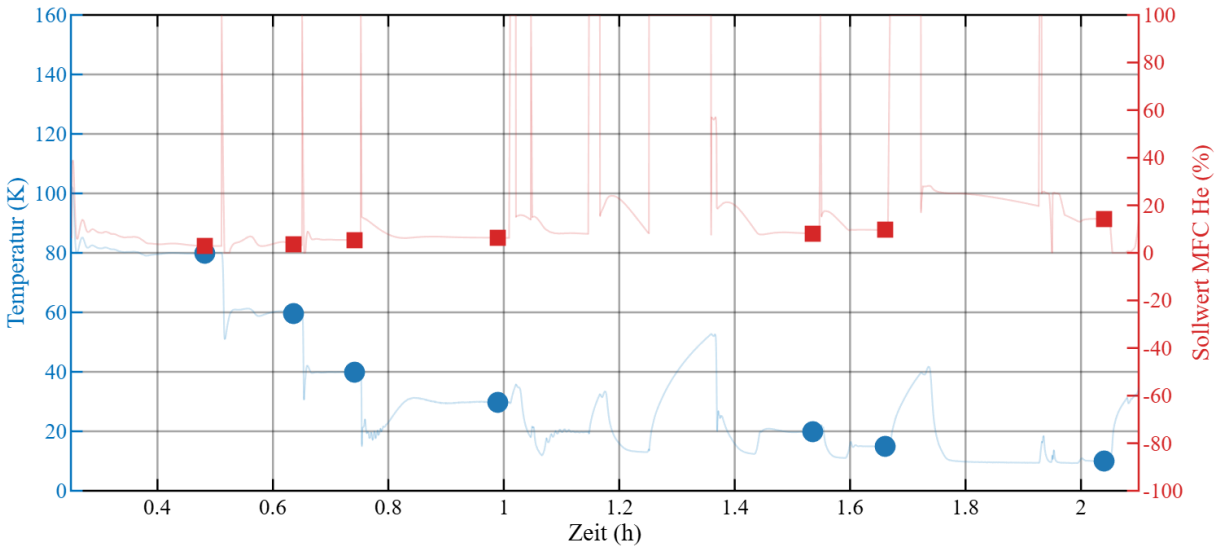


Abbildung **6**-1: Messung 22.04.2026: Auswertung der Betriebspunkte für $80\,\mathrm{K}$, $60\,\mathrm{K}$, $40\,\mathrm{K}$, $30\,\mathrm{K}$, $20\,\mathrm{K}$, $15\,\mathrm{K}$ und $10\,\mathrm{K}$ mit gleitender Stabilitätsanalyse

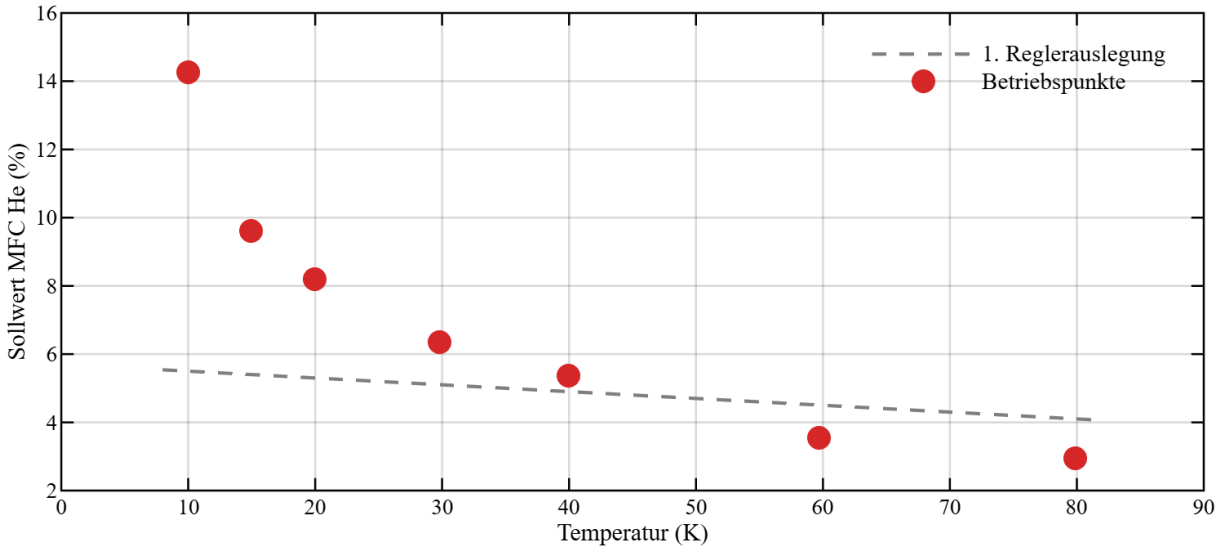


Abbildung **6**-2: Plot der Betriebspunkte

Abbildung **6**-1 zeigt die Messung, welche nach der Anpassung gemacht wurde. Dabei wurden die unter der Abbildung genannten Temperaturen getestet. Alle Solltemperaturen

[1]Als Kriterium für den eingeschwungenen Zustand wurde eine maximale Temperaturschwankung von $\Delta T \leq 2\,\mathrm{K}$ über ein Zeitfenster von $t = 120\,\mathrm{s}$ definiert. Der Mittelwert des Sollwertes von $\mathrm{MFC_{He}}$ wurde mit den letzten $20\,\%$ bis $4\,\%$ des Zeitraumes des Betriebspunktes gebildet.

wurden zufriedenstellend erreicht. Danach wurden die Regelparameter bei $10\,\mathrm{K}$ noch einmal optimiert und dann der Regler ein weiteres Mal mit den neuen Regelparametern bei $30\,\mathrm{K}$ getestet. Dies hat zu sehr zufriedenstellenden Ergebnissen mit minimalen Oszillationen im $0{,}1\,\mathrm{K}$-Bereich für den $10\,\mathrm{K}$ und $30\,\mathrm{K}$ Betriebspunkt geführt.

6.2 Finales Regelkonzept

Das Regelkonzept noch einmal zusammengefasst:

Das System erhält den Sollwert:

- **Solltemperatur (Zieltemperatur)**

Dafür werden die Regelgrößen:

- **Druck in der Gasphase des Dewar** durch die Stellwerte:
  - Sollwert von $\mathrm{PC_{He}}$
  - Digitalwert zur Steuerung des Buerkert-Nadelventil

  geregelt,
- **Druck im Moderatorkreislauf** durch den Stellwert:
  - $U_{\text{Transferheber}}$ (Öffnungsgrad des Nadelventils im Transferheber)

  geregelt und
- **Temperatur im Moderatorbehälter** über die Stellwerte:
  - $U_{\text{Transferheber}}$ (Öffnungsgrad des Nadelventils im Transferheber)
  - Sollwert des $\mathrm{MFC_{He}}$

  geregelt.

Der Sollwert von $\mathrm{PC_{He}}$ ist $0{,}5\,\mathrm{bar}$ und kann manuell vom Benutzer geändert werden. Ein PI^2-Regler gibt den Digitalwert für das Buerkert-Ventil aus. Der Sollwert des Reglers ist $\text{Sollwert}_{\mathrm{PC_{He}}} + 0{,}01\,\mathrm{bar}$.

$U_{\text{Transferheber}}$ wird während der $\geq 35\,\mathrm{K}$-Regelung mit der druckabhängigen Funktion 6. Grades aus Kapitel 5.2.2 gesteuert.

Der Sollwert vom $\mathrm{MFC_{He}}$ wird vom $\geq 35\,\mathrm{K}$-Regler ausgegeben. Unter $35\,\mathrm{K}$ wird der Tieftemperaturregler aktiviert. Dieser gibt dann den Sollwert vom $\mathrm{MFC_{He}}$ aus und stellt

$U_{\text{Transferheber}}$ auf $1{,}5\,\mathrm{V}$. Bei einer Differenz von unter $1\,\mathrm{K}$ zwischen Kryostattemperatur und Solltemperatur wird $U_{\text{Transferheber}}$ auf einen kleineren Wert gesetzt.

6.3 Wasserstoffmessungen

Im Anschluss wurde das System in zwei Messungen mit Wasserstoff als Moderatorgas und Helium als Kühlgas getestet. Hier greift die Ausnahme in der Funktion Auto Cooldown (s. 4.2.8), durch die Standby bei H_2 übersprungen wird.

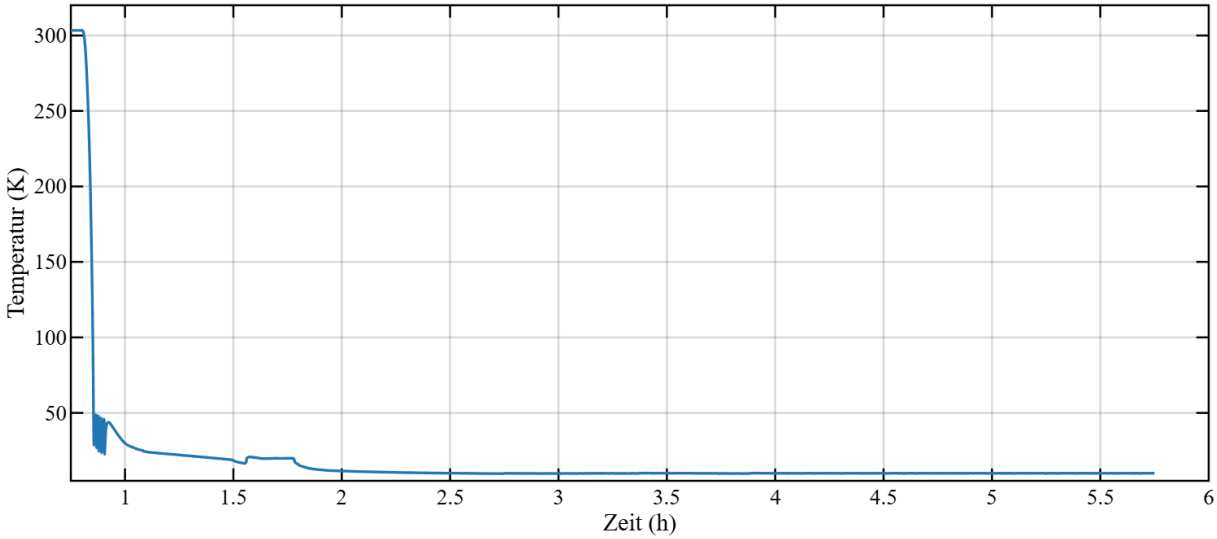


Abbildung **6**-3: Messung 24.04.2026: Kryostattemperatur

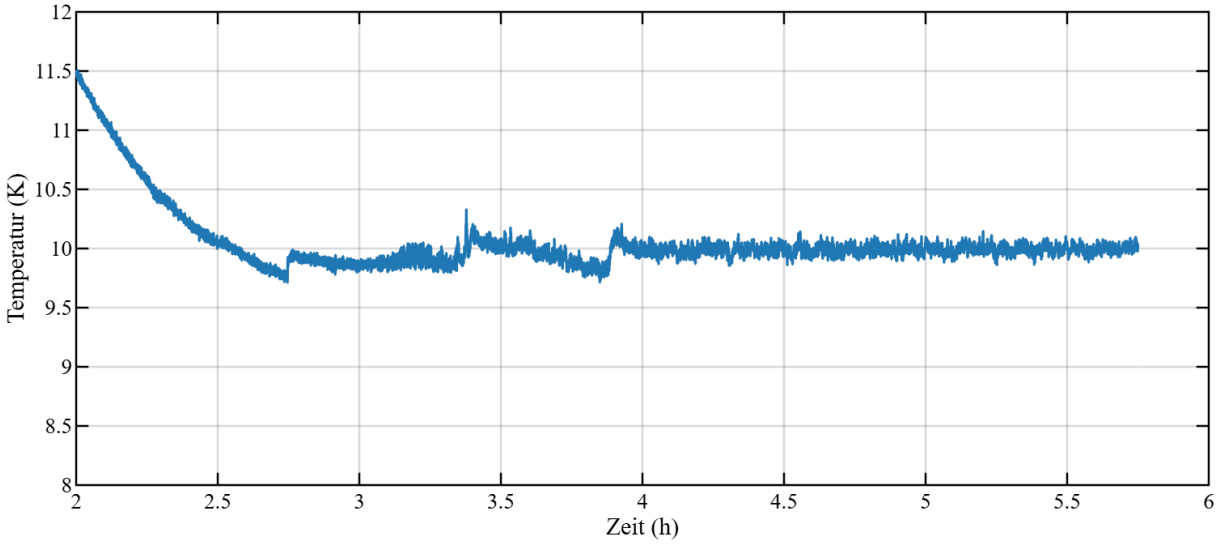


Abbildung **6**-4: Messung 24.04.2026: Kryostattemperatur, Ausschnitt um den Betriebspunkt

Die Messung zeigt, dass der Kryostat auch mit Wasserstoff als Moderatorgas automatisiert funktioniert. Nach der Messung wurden zwei weitere Änderungen vorgenommen:

- Die Funktion, welche $U_{\text{Transferheber}}$ solltemperaturabhängig anpasst, wird erst beim Erreichen der Solltemperatur $+\ 1\,\text{K}$ für den Rest des Betriebs eingeschaltet. Darüber ist $U_{\text{Transferheber}}$ auf $1{,}5\,\text{V}$ gesetzt. Eine Änderung der Solltemperatur setzt diesen Vorgang zurück.
- Abbildung **6**-3 zeigt bei ca. $0{,}5\,\text{h}$ eine Oszillation: Der Regler wechselt zwischen dem Normalbetrieb und dem Tieftemperaturregler. Um das Verhalten zu vermeiden, wurde der Parameter für das Zurückwechseln vom Tieftemperaturregler zum Normalbetrieb von $40\,\text{K}$ auf $45\,\text{K}$ angepasst.

Abbildung **6**-5 zeigt, dass keine Oszillation mehr auftritt und die Solltemperatur schneller erreicht wird. Die Zeit zum Erreichen der Solltemperatur war vorher ca. $140\,\text{min}$. Nach den Änderungen ist sie noch ca. $55\,\text{min}$.

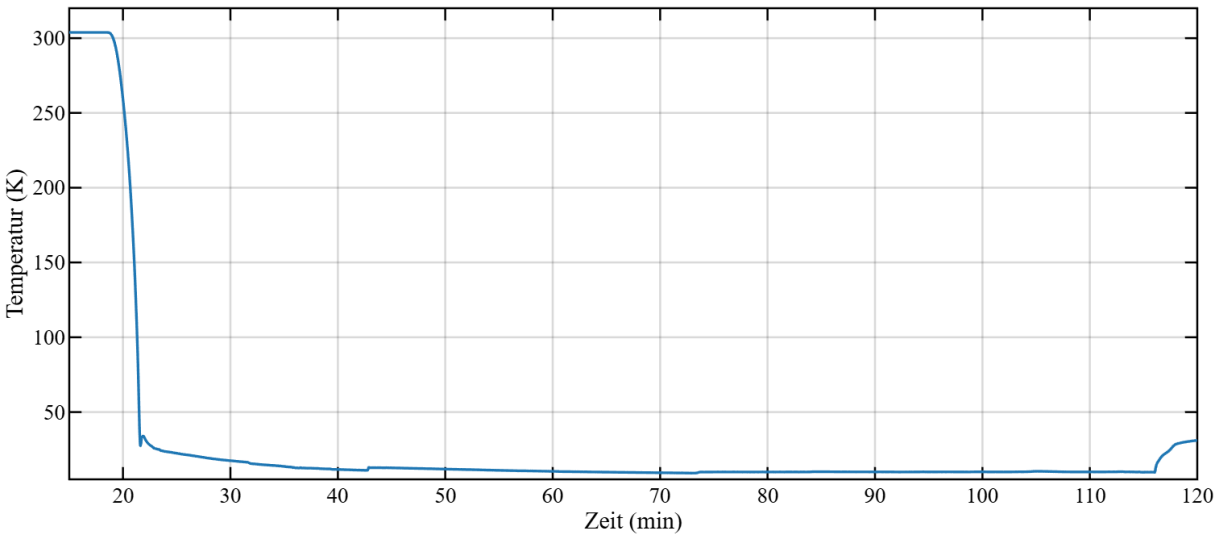


Abbildung **6**-5: Messung 29.04.2026: Kryostattemperatur

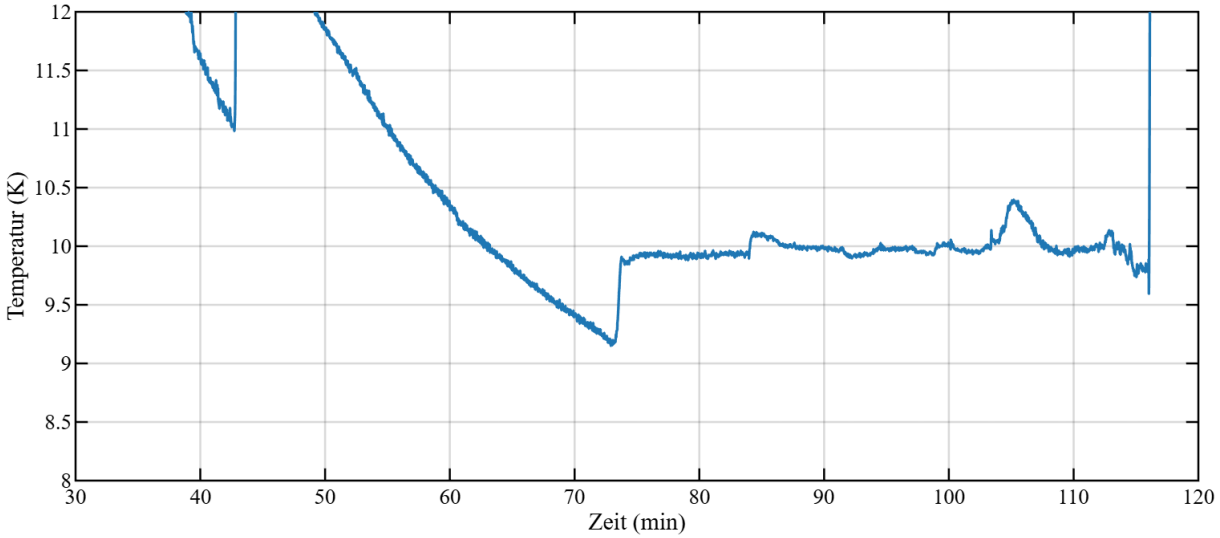


Abbildung **6**-6: Messung 29.04.2026: Kryostattemperatur, Ausschnitt um den Betriebspunkt

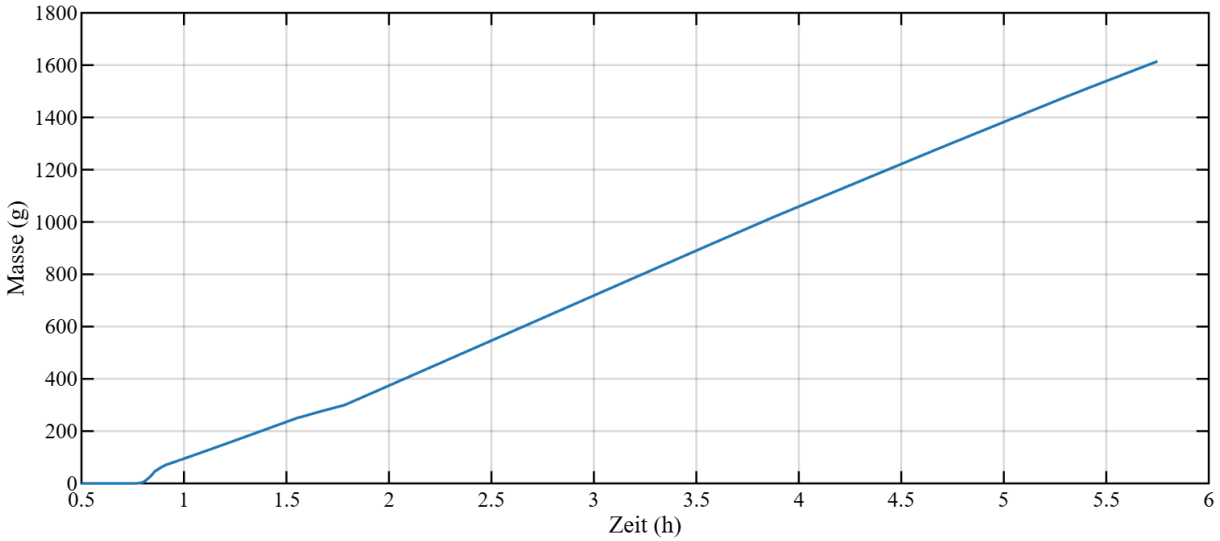


Abbildung **6**-7: Messung 24.04.2026: Integral des Helium-Massenstroms

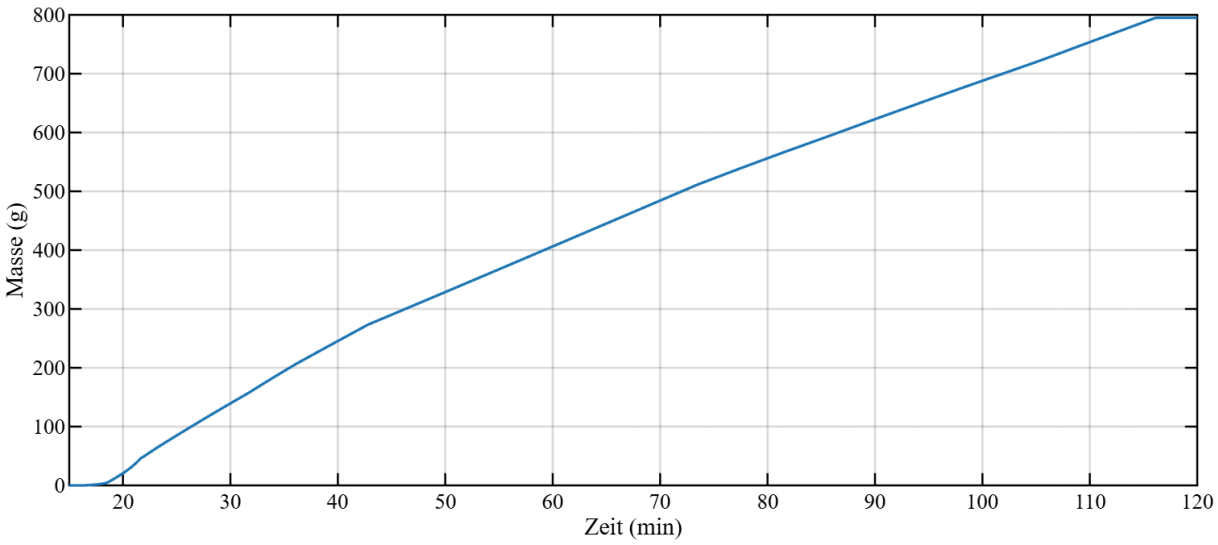


Abbildung **6**-8: Messung 29.04.2026: Integral des Helium-Massenstroms

Setzt man die Zeit für das Erreichen der Zieltemperatur $10\,\mathrm{K}$ in Abbildung **6**-4 bei ca. $2{,}75\,\mathrm{h}$ und in Abbildung **6**-6 bei $75\,\mathrm{min}$ fest, so kann man aus den Abbildungen **6**-7 und **6**-8 Werte für den Verbrauch bis zu diesem Zeitpunkt entnehmen. $1\,\mathrm{l}$ flüssiges Helium hat eine Dichte von ca. $125\,\mathrm{g/l}$. Damit kann für die Messung vom 24.04.2026 ein Verbrauch von $623\,\mathrm{g}$ oder ca. $5\,\mathrm{l}$ flüssiges Helium bei $2{,}75\,\mathrm{h}$ entnommen werden. In der Messung vom 29.04.2026 lag der Verbrauch bei $522\,\mathrm{g}$ oder ca. $4{,}2\,\mathrm{l}$ flüssiges Helium bei $75\,\mathrm{min}$. Die Verbesserungen zwischen den Messungen haben dazu geführt, dass durch die Verbesserung der Regelung ca. $16\,\%$ weniger flüssiges Helium und $85\,\mathrm{min}$ weniger Zeit zum Erreichen der Solltemperatur $10\,\mathrm{K}$ gebraucht werden.

6.4 Problematik mit PPT-200 und Scrollpumpe im Zusammenhang mit Wasserstoff

Ursprünglich war es geplant, dass der PPT-200-Vakuumdrucksensor, der bis zu $1 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{mbar}$ messen kann, als Sensor für die Pump and Purge-Funktion genutzt wird. In den Messungen ist allerdings aufgefallen, dass der Sensor den Druck für Methan oder Wasserstoff nicht bestimmen kann, da die Messmethode des Sensors abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Gases ist und daher die Kalibrierung der Messröhre auf Luft für diese Gase ungeeignet ist.

Zudem ist bei den Messungen mit Wasserstoff aufgefallen, dass die Scrollpumpe den Moderatorkreislauf nicht evakuieren kann, wenn dieser mit Wasserstoff gefüllt ist. Die Pumpe erreicht lediglich einen Druck von ca. $180\,\mathrm{mbar}$. Dieser Druck ist zu hoch für die

Funktion Pump and Purge und lässt zudem das Öffnen des epnv2-Ventils nicht zu. Dies führt zu einem Druckschlag auf die Abgasseite der Turbopumpe. Danach schaltet sich die Turbopumpe von selbst aus.

Für den zukünftigen Betrieb des Moderatorkryostaten ist die Beschaffung einer geeigneten, vom Pumpstand für das Isolationsvakuum separaten, Pumpstation mit geeigneter gasartunabhängiger Messinstrumentierung notwendig.

6.5 Auswertung der Betriebspunkte

Die stationären Betriebspunkte des Kryostaten wurden mittels einer datengetriebenen Extraktionsmethode aus den Messdaten identifiziert. Für jede Zieltemperatur T_{ziel} wurde ein gleitendes Zeitfenster der Länge $t_{\text{Fenster}} = 120\,\text{s}$ über die Messdaten geschoben. Als Gütekriterium diente der mittlere quadratische Abstand der Temperaturdaten im Fenster zur Zieltemperatur:

$$d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (T_i - T_{\text{ziel}})^2 \tag{6.1}$$

Das Fenster mit minimalem d wurde als stationärer Betriebspunkt gewertet, sofern folgende Bedingungen erfüllt waren:

- Temperaturschwankung im Fenster $\leq 0{,}4\,\text{K}$ (unter 20 K) bzw. $\leq 1{,}0\,\text{K}$ (über 20 K)
- MFC-Sollwert-Schwankung im Fenster $\leq 2\,\%$ zum Ausschluss von Regelvorgängen und Abschaltmomenten
- Abstand des Mittelwerts zur Zieltemperatur $\leq 0{,}25\,\text{K}$

Der Betriebspunkt-Mittelwert wurde aus dem Bereich von $80\,\%$ bis $96\,\%$ des gefundenen Fensters berechnet, um verbleibende Einschwingeffekte zu eliminieren. Pro Zieltemperatur wurde genau ein Betriebspunkt extrahiert. Die Zieltemperaturen für die Ermittlung der Betriebspunkte wurden in $5\,\text{K}$-Schritten von $10\,\text{K}$ bis $80\,\text{K}$ definiert. Die extrahierten Betriebspunkte sind in den Abbildungen **6**-9 bis **6**-14 dargestellt.

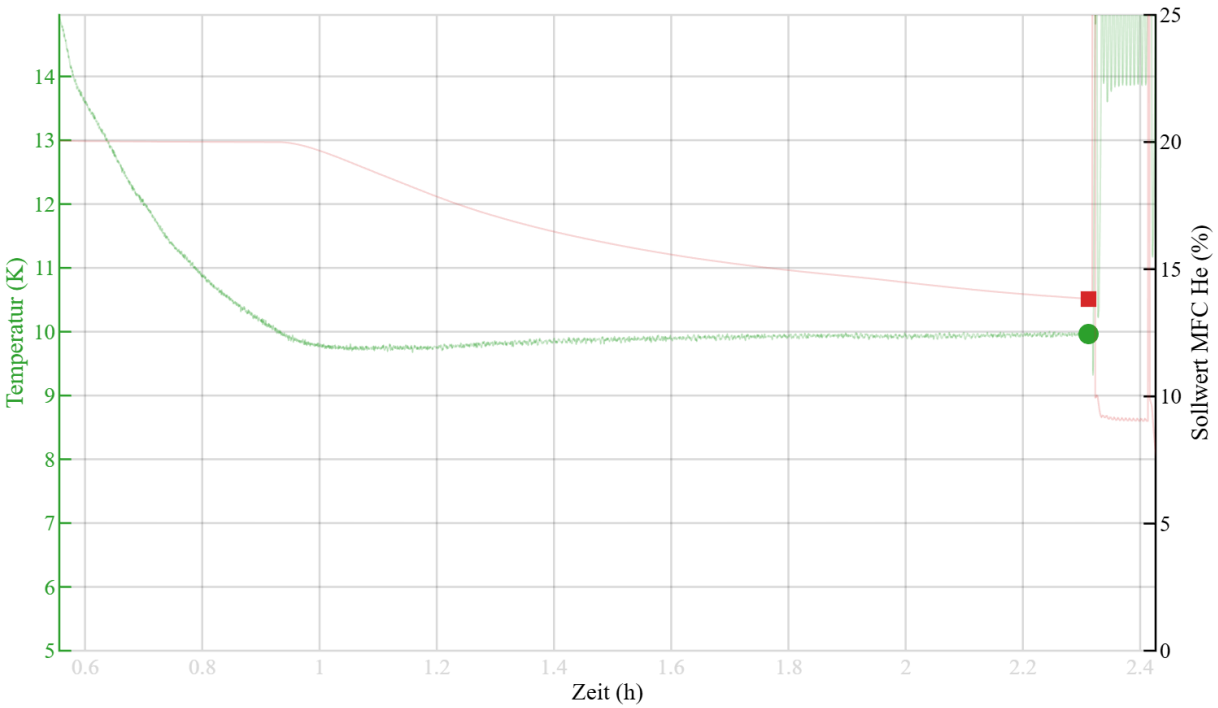


Abbildung **6**-9: Extrahierter Betriebspunkt der Methan-Messung vom 20.04.26. Kreise: Kryostat-Temperatur der Betriebspunkte (links), Quadrate: MFC-He-Sollwert der Betriebspunkte (rechts).

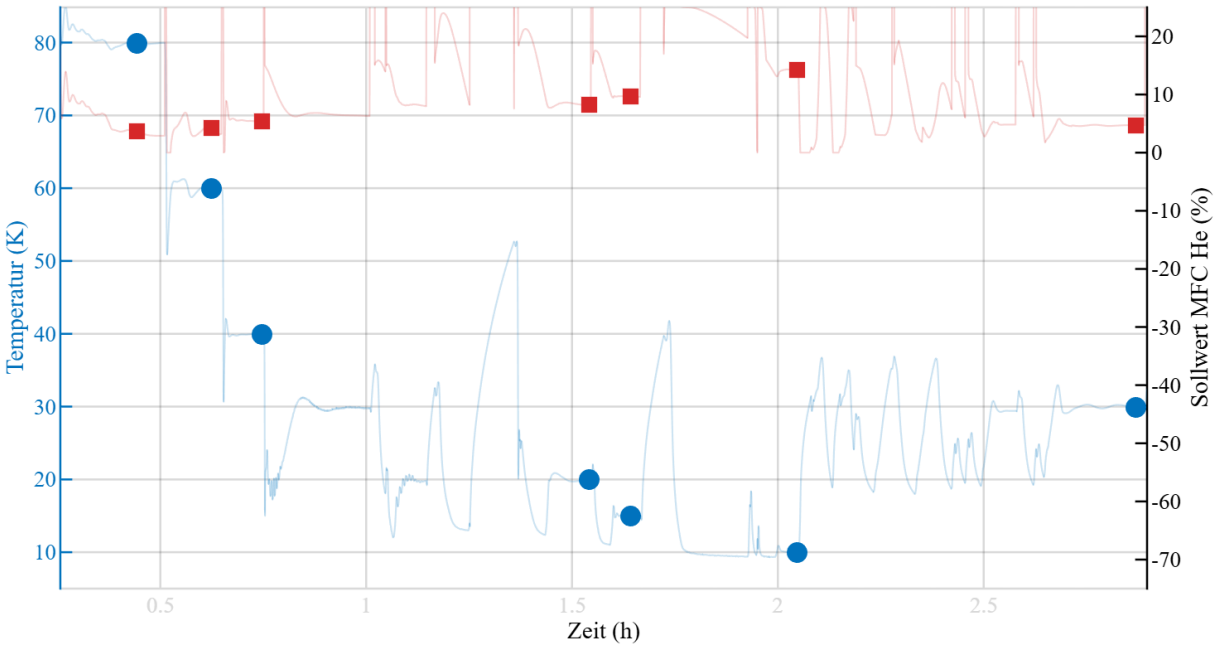


Abbildung **6**-10: Extrahierte Betriebspunkte der Methan-Messung vom 22.04.26.

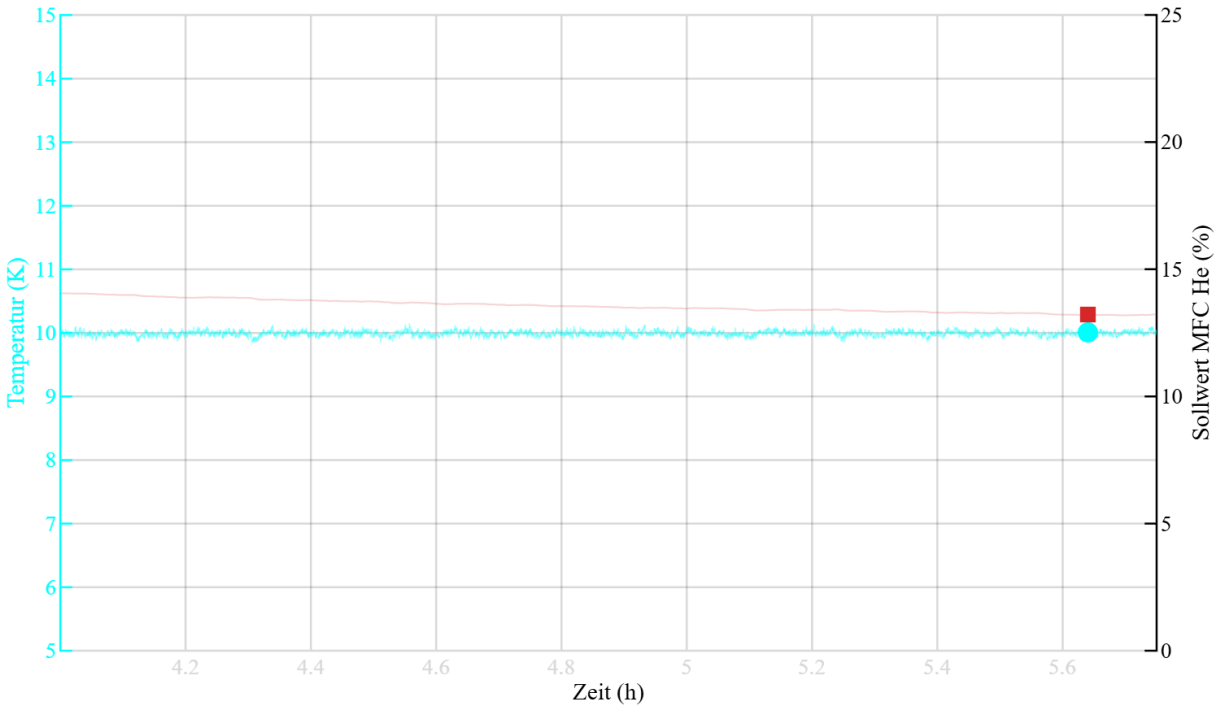


Abbildung **6**-11: Extrahierter Betriebspunkt der Wasserstoff-Messung vom 24.04.26. Die Betriebspunktsuche beginnt nach $t = 2{,}5\,\mathrm{h}$, um den Einschwingtransient nach dem Abkühlvorgang auszuschließen.

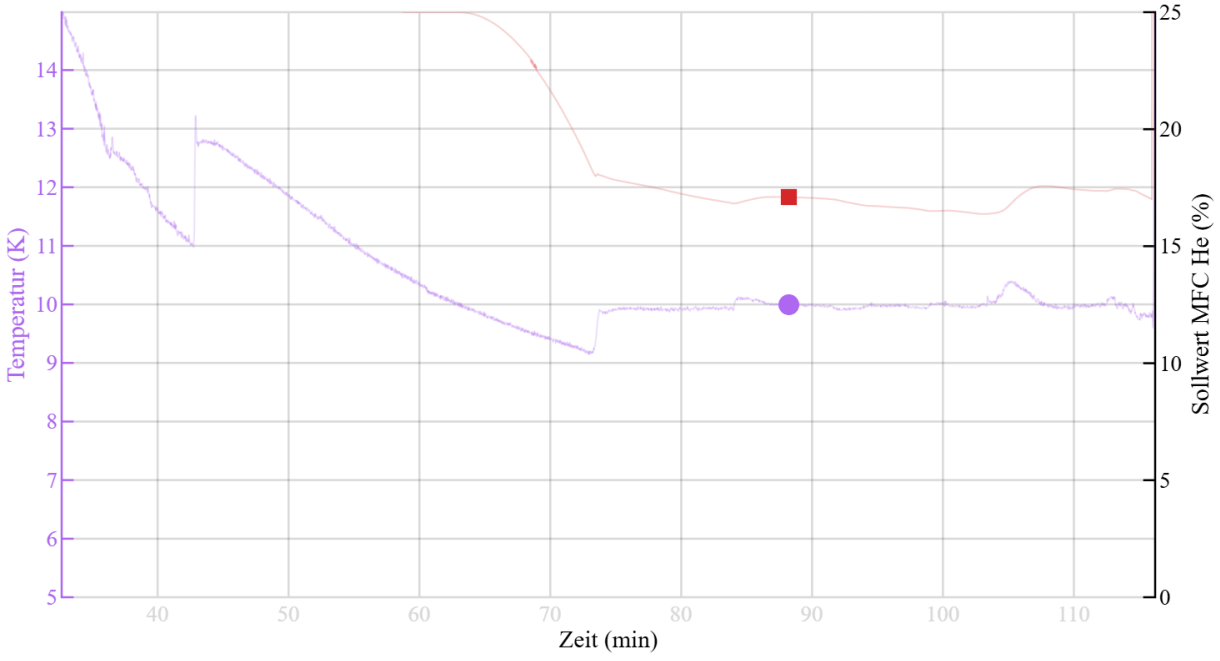


Abbildung **6**-12: Extrahierter Betriebspunkt der Wasserstoff-Messung vom 29.04.26.

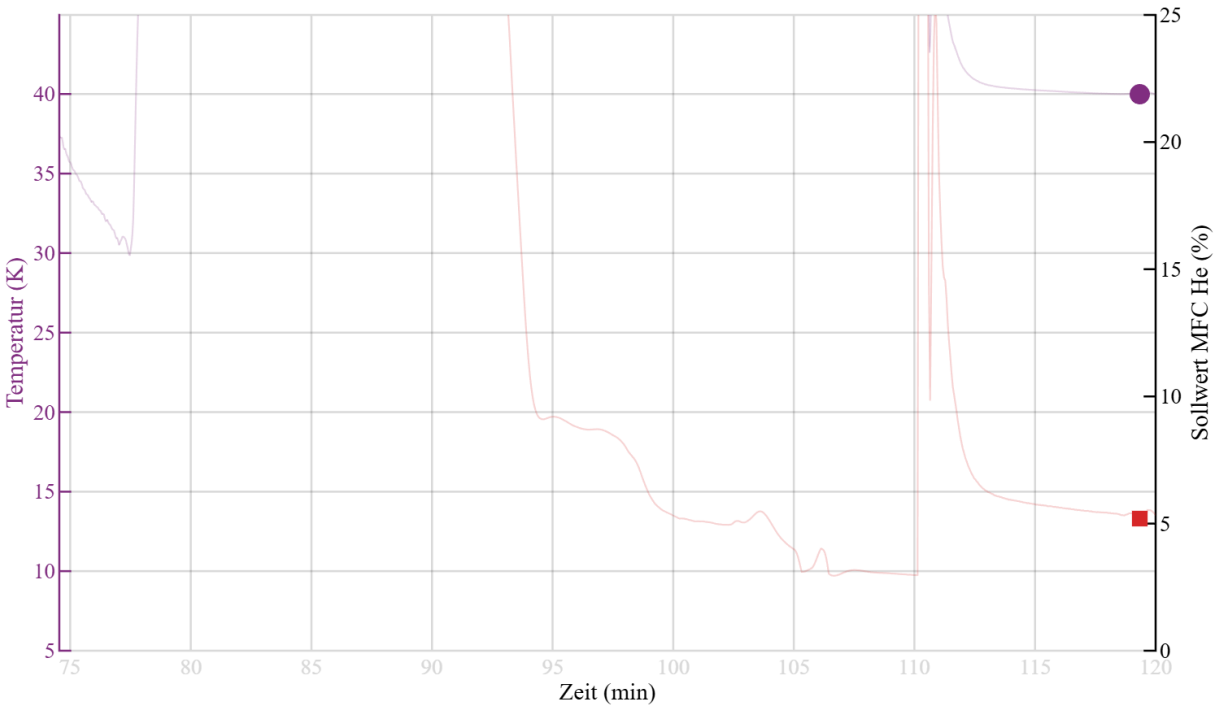


Abbildung **6**-13: Extrahierter Betriebspunkt der Test-Messung.

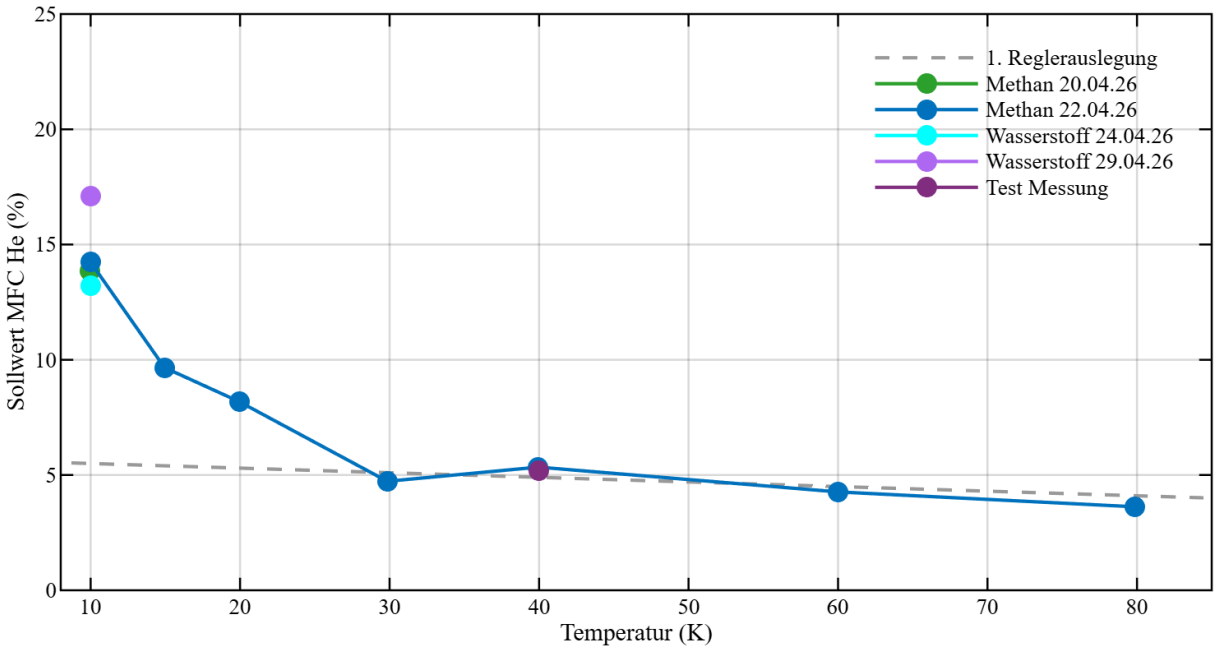


Abbildung **6**-14: Vergleich der extrahierten Betriebspunkte aller fünf Messungen sowie die ursprüngliche lineare Vorsteuerungskennlinie (1. Reglerauslegung, gestrichelt).

In Abbildung **6**-14 sind alle Betriebspunkte aller Messungen zu sehen. Dort sieht man, dass die erste Reglerauslegung bis $30\,\mathrm{K}$ sehr nah an den Betriebspunkten liegt. Daher funktioniert das initiale Regelkonzept bis zu dieser Temperatur. Unter $30\,\mathrm{K}$ steigt der

Kühlmitteldurchfluss, welcher nötig ist, um den Betriebspunkt zu erreichen, stärker an. Deshalb musste der Tieftemperaturregler entwickelt werden. Zudem sieht man auch die Schwankung der Betriebspunkte durch verschiedene Faktoren, die Einfluss auf das System haben. Diese Faktoren sind maßgeblich:

- Außentemperatur
- Sonneneinstrahlung direkt auf den Kryostaten
- Länge der Messung und die damit verbundene restliche abzuführende Wärmeenergie im System (sehr gut bei der Messung vom 29.04.26 zu sehen, welche wesentlich kürzer war als die anderen Messungen)

7 Simulationsmodell zum Wärmetransport im Kryostaten

In diesem Kapitel werden der Aufbau und die Ergebnisse der thermodynamischen und fluiddynamischen Simulation erläutert und diese mit den Ergebnissen aus den realen Messungen verglichen. Das Verhalten im Inneren des Moderatorkryostaten, welches messtechnisch nicht zugänglich ist, soll mittels der Simulation dargestellt werden.

7.1 Modellaufbau

In diesem Unterkapitel werden die verwendeten Modelle erklärt und beschrieben, weshalb diese verwendet werden.

7.1.1 Methan: Apparent heat capacity method

Das Methan befindet sich in dem Kryostaten in allen drei Phasen, hat keinen Massenstrom im Betriebspunkt und liegt im thermisch relevanten Bereich, dem Moderator-Wärmetauscher, unterhalb des Schmelzpunktes vor. Im relevanten Bereich entfallen damit, physikalisch betrachtet, die Konvektionseffekte, und der Wärmetransport erfolgt ausschließlich durch Festkörperwärmeleitung. Methan als Fluid mit mehreren Phasenübergängen zu simulieren würde nur einen minimalen Effekt haben, da die flüssige und gasförmige Phase in einem nicht relevanten, durch Wärmeleitung des Edelstahl-Rohres dominierten, Teil des Kryostaten liegen. Daher wird hier die „Apparent heat capacity method“ angewandt.

Bei dieser Methode wird das Methan im gesamten Kryostaten als Festkörper-Zone dargestellt. DIe temperatruabhängige Wärmeleitfähigkeit λ(T) wird mit mehreren Polynomen für verschiedene Temperaturbereiche dargestellt. Im stationären Zustand ohne Massenstrom sind Dichte und spezifische Wärmekapazität c_p für die Lösung der Energiegleichung irrelevant – allein die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit $\lambda(T)$ bestimmt das Temperaturfeld.

Die Wärmeleitfähigkeit von festem Methan liegt im relevanten Temperaturbereich von $0{,}3\,\mathrm{W/(m\,K)}$ bis $1{,}5\,\mathrm{W/(m\,K)}$ (Phase II ($5\,\mathrm{K}$ bis $21\,\mathrm{K}$)) bzw. von $0{,}4\,\mathrm{W/(m\,K)}$ bis $0{,}6\,\mathrm{W/(m\,K)}$ (Phase I ($21\,\mathrm{K}$ bis $90\,\mathrm{K}$)), nach Meyer et al. 2022 unter Bezug auf Jezowski et al. 1997 und Konstantinov et al. 1999[25]. Die Datenlage zur Wärmeleitfähigkeit von Methan im kryogenen Bereich ist eingeschränkt. Für die flüssige und gasförmige Phase stehen NIST-Referenzdaten zur Verfügung, während für die feste Phase lediglich einzelne Messwerte aus den genannten Veröffentlichungen vorliegen. Da die Wärmeleitung des Methans gegenüber der Rohrwand einen untergeordneten Einfluss auf das Gesamtergebnis hat, wird $\lambda(T)$ als zusammengesetzte Funktion aus stückweisen Polynomen (*piecewise polynomials*) aufgebaut, die an die verfügbaren Datenpunkte angepasst wurden. Die Polynome werden dabei an charakteristischen Tief- und Hochpunkten der Wärmeleitfähigkeitskurve gefittet (Abbildung **7**-1).

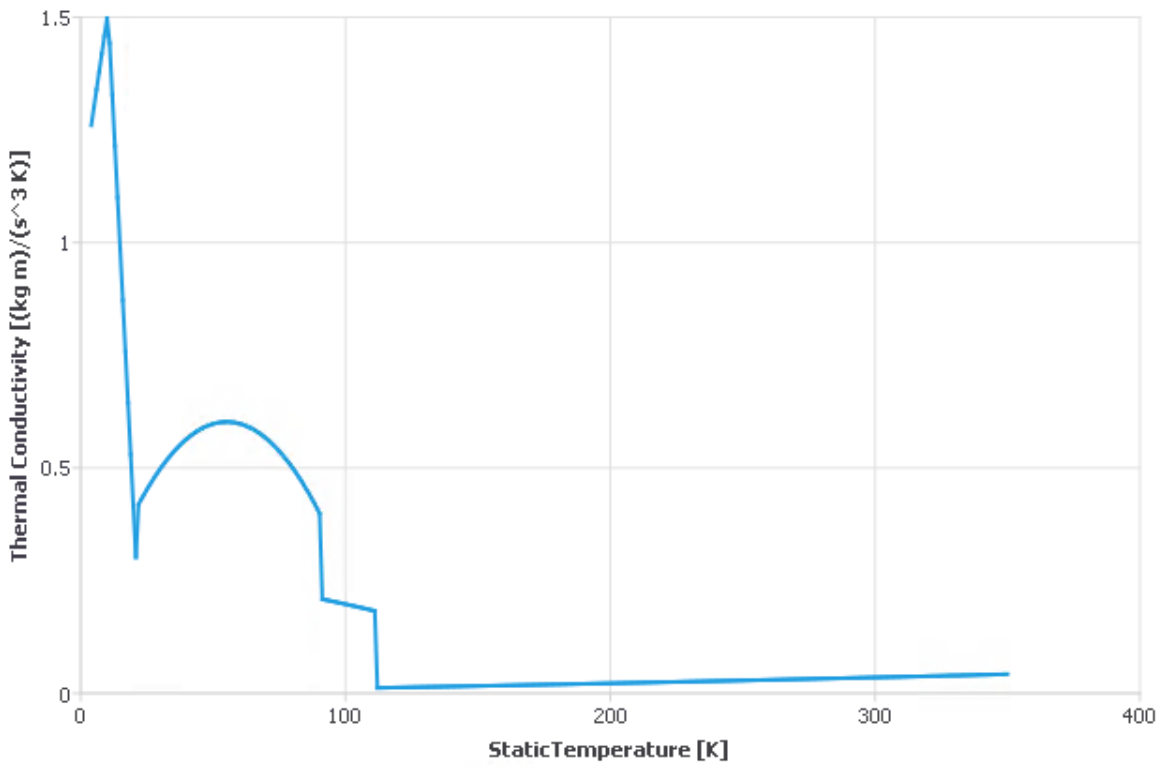


Abbildung **7**-1: Simulationsdaten: Stoffdaten: Wärmeleitfähigkeit Methan

Der Einfluss der Unsicherheit in $\lambda_{\mathrm{CH_4}}(T)$ auf das Simulationsergebnis ist gering, da der thermische Widerstand der Methan-Schicht parallel zur gut leitenden Rohrwand liegt und ihr Beitrag zum Gesamtwärmestrom untergeordnet ist.

7.1.2 Helium: Turbulenzmodell – k-ω SST

Zur Abschätzung des Strömungsregimes wird die Reynolds-Zahl für die maßgeblichen Betriebsbedingungen berechnet. Bei einem Massenstrom von $\dot{m} = 0{,}084\,\mathrm{g/s}$ gasförmigem Helium, einer Dichte von $\rho \approx 11\,\mathrm{kg/m^3}$ sowie einer dynamischen Viskosität von $\mu \approx 1 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{Pa\,s}$ bei Temperaturen zwischen $5\,\mathrm{K}$ und $10\,\mathrm{K}$ ergibt sich für den minimalen Rohrdurchmesser $D = 4\,\mathrm{mm}$:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} = \frac{4 \cdot 8{,}4 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{kg/s}}{\pi \cdot 4 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m} \cdot 1 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{Pa\,s}} \approx 26800 \tag{7.1}$$

Dieser Wert liegt mit $Re \approx 26800$ deutlich oberhalb der kritischen Reynolds-Zahl $Re_{\mathrm{krit}} \approx 2300$ [36, S. 10] und kennzeichnet die Strömung als vollturbulent. Daher benötigt das Simulationsmodell ein Turbulenzmodell.

Für die Simulation wird das k-ω SST-Modell (Shear Stress Transport) nach Menter (1994) verwendet.[24] Das Modell kombiniert zwei bewährte Turbulenzmodelle: In wandnahen Bereichen wird das k-ω-Modell eingesetzt, das die Grenzschicht direkt bis zur Wand auflöst. In der freien Strömung abseits der Wand wird auf eine k-ε-Formulierung umgeschaltet, die dort numerisch robuster ist. Der Übergang zwischen beiden Bereichen erfolgt automatisch anhand der lokalen Wanddistanz. Gegenüber dem Standard-k-ω-Modell verhindert das SST-Modell zusätzlich eine Überschätzung der turbulenten Vermischung in Bereichen mit starken Druckgradienten, was die Vorhersagegenauigkeit bei komplexen Strömungen deutlich verbessert.[24]

Die Modellwahl wird durch folgende Eigenschaften des SST-Modells begründet:

Wandnahe Genauigkeit: Das k-ω-Modell löst die Grenzschicht bis zur Wand auf und liefert dort präzisere Ergebnisse als das k-ε-Modell, das auf Wandfunktionen angewiesen ist. Da der Wärmeübergang vom Rohr in das Helium maßgeblich in der wandnahen Grenzschicht stattfindet, ist eine genaue Auflösung dieser Zone entscheidend für die Vorhersagegenauigkeit der Simulation.

Extreme Stoffwertvariationen: Helium weist im Temperaturbereich von $5\,\mathrm{K}$ bis $10\,\mathrm{K}$ stark temperaturabhängige Stoffwerte auf. Dichte, dynamische Viskosität und Wärmekapazität variieren in diesem Bereich erheblich, was zu einer ortsabhängigen lokalen Reynolds-Zahl entlang der Strömung führt und eine robuste Turbulenzmodellierung erfordert.

Numerische Stabilität: Das SST-Modell gilt als numerisch stabil und ist für industrielle Strömungssimulationen in komplexen Geometrien etabliert. In ANSYS ist es als

Standardempfehlung für wandbehaftete Strömungen implementiert.[3]

7.1.3 Prismenschichten

Das k-ω SST-Modell erfordert eine ausreichend feine Vernetzung in Wandnähe, um die viskose Unterschicht direkt aufzulösen. Maßgebliche Kenngröße ist dabei der dimensionslose Wandabstand y^+, der für das SST-Modell einen Wert von $y^+ \leq 1$ einhalten sollte.[3]

An allen Grenzflächen zwischen dem strömenden Helium und den Rohrwänden werden daher Prismenschichten eingesetzt, die den Übergangsbereich zwischen Wand und freier Strömung geometrisch feiner auflösen als das umliegende Volumennetz. Dies gewährleistet sowohl eine präzise Erfassung des Wärmeübergangs als auch eine stabile Berechnung der wandnahen Strömungsgrößen.

Die Anzahl der Prismenschichten wurde anhand eines vereinfachten Validierungsmodells bestimmt: einem $3\,\mathrm{m}$ langen geraden Rohr mit Helium als Fluid und zwei definierten Wärmequellen. In diesem Modell wurden verschiedene Schichtanzahlen untersucht und hinsichtlich Rechenaufwand und Ergebnisgenauigkeit bewertet. Als optimaler Kompromiss wurden 5 Prismenschichten gewählt.

Die Temperatur am Ausgang des Rohres wurde hier als Benchmark verwendet. Die Helium-Erwärmung über die Rohrlänge betrug ca. $0{,}5\,\mathrm{K}$. Eine Erhöhung der Prismenschichten-Anzahl von 4 auf 5 führte zu einer Änderung der Auslasstemperatur von weniger als $0{,}001\,\mathrm{K}$. Eine weitere Erhöhung der Prismenschichten-Anzahl ergab in dieser einfachen Testgeometrie keine messbare Änderung der Auslasstemperatur. Die Gesamtdicke der 5 Prismenschichten beträgt $0{,}5\,\mathrm{mm}$ und der Wachstumsfaktor ist $1{,}2$.

Da jede zusätzliche Prismenschicht die Gesamtzellanzahl des Netzes erhöht, steigt der Rechenaufwand pro Iteration näherungsweise proportional zur Schichtanzahl. Die Wahl von 5 Schichten stellt dabei einen Kompromiss zwischen Auflösungsgenauigkeit und Rechenaufwand dar. Abbildung **7**-2 zeigt einen Querschnitt durch ein Leitungsrohr mit denen im Wandmaterial und Fluidquerschnitt dargestellten Volumenmeshzellen.

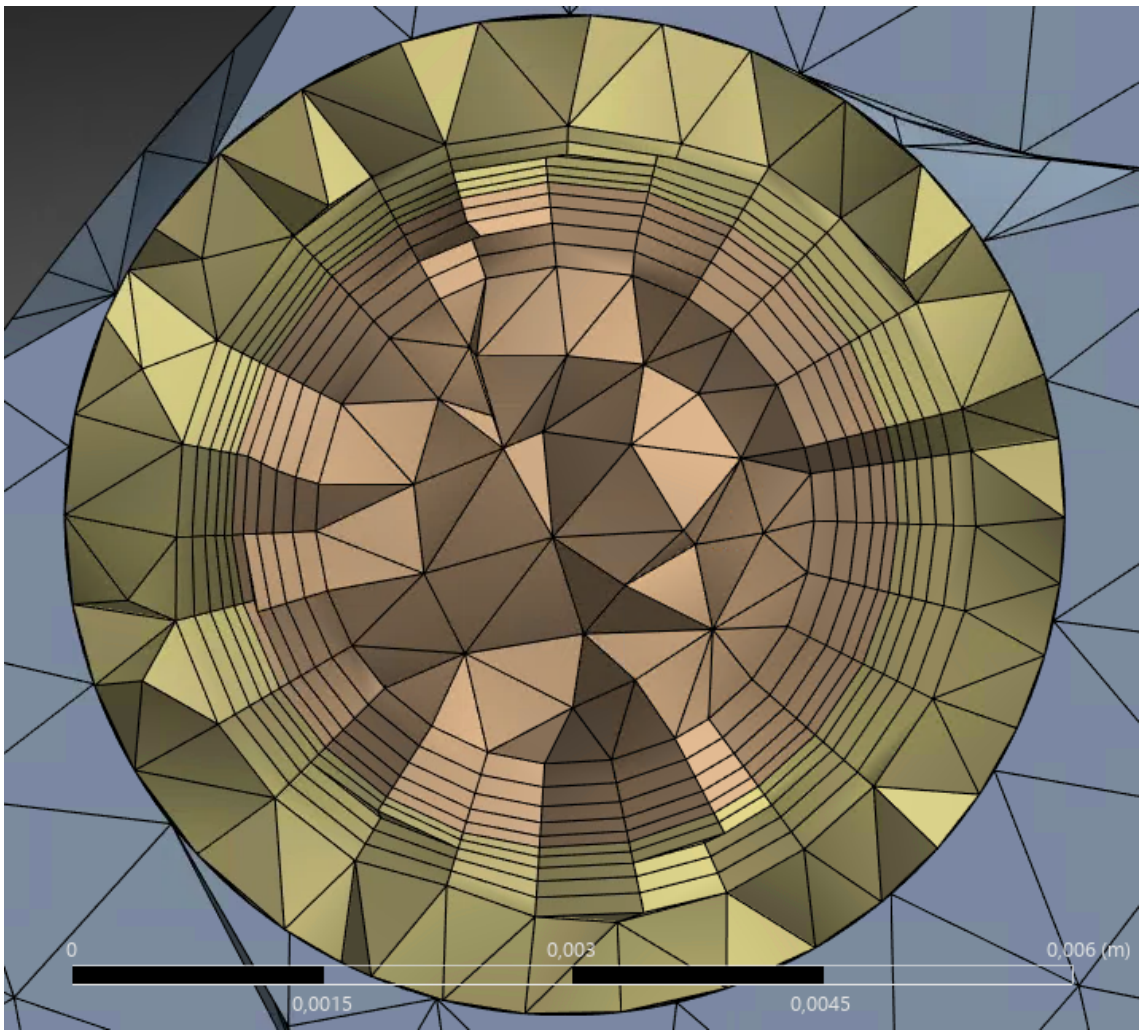


Abbildung **7**-2: Test-Meshdaten: Rohrquerschnitt 4mm Innendurchmesser (Rohr gelb, Helium/Methan braun)

7.1.4 User-Defined-Functions

Die Multilayer-Isolation besteht aus einer Vielzahl dünner Folienlagen, die in der Praxis eine statistisch verteilte, nicht reproduzierbare Geometrie aufweisen. Knicke, Wölbungen und Berührungspunkte zwischen den Lagen entstehen zufällig während der Montage und variieren lokal stark. Eine geometrisch exakte Abbildung dieser Struktur in der Simulation ist daher nicht praktikabel. Zudem bietet ANSYS hier keine direkte Funktion, mit der die MLI in der Simulation dargestellt werden kann. Aus diesen Gründen wird der Wärmeeintrag durch die MLI nicht geometrisch aufgelöst, sondern als äquivalenter Wärmefluss über eine UDF als Randbedingung auf den Außenflächen der Rohre aufgeprägt.

Der Widerstand an den Kontaktstellen der Spacer ist druckabhängig und messtechnisch schwer zugänglich, weshalb eine direkte Abbildung in der Simulation nicht möglich ist. Der entscheidende Vorteil der UDF liegt jedoch darin, dass der effektive Kontaktwiderstand der Spacer durch einfache Anpassung des aufgeprägten Wärmeflusses parametrisch variiert werden kann, ohne eine Änderung der Geometrie oder des Netzes zu erfordern.

7.1.5 UDF: Wärmestrahlung

Der Wärmeeintrag der Wärmestrahlung auf der MLI (s. Tab. 7.1) und dem mechanisch gebürsteten Aluminium (s. Tab. 2.2) schwankt stark mit der Temperatur. Die MLI wird über eine UDF als Wärmestrom auf der Wand dargestellt. Die UDF verwendet die lokale Wandtemperatur aus Fluent als T_c (s. Tab. 7.1) und rechnet die lokale Wärmestromdichte mit der Modified Lockheed Equation (s. Gleichung 2.4) aus.

Der Wärmeeintrag an der Moderatorgeometrie, welche nicht mit MLI umwickelt ist, wird über Strahlungsaustausch mit der Umgebung mit einer Emissivität von $2\,\%$ definiert. Dies entspricht der Emissivität von Aluminium bei $20\,\mathrm{K}$ [26] (s. Tab. 2.2).

Die Moderatorgeometrie ist ein konzentrischer Zylinder innerhalb der Vakuumaußenhülle. Da die Vakuumaußenhülle die Moderatorgeometrie vollständig umschließt, gilt ein Sichtfaktor von $F_{12} = 1$ [15], und es kann mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (Als Randbedingung (RB): Strahlungsaustausch mit der Umgebung in der Simulation dargestellt) gerechnet werden. So kann die Außenhülle der Vakuumisolierung für den Strahlungsaustausch und damit die Simulation vernachlässigt werden. Dies reduziert die Größe des Modells erheblich.

Tabelle 7.1: Wärmefluss durch MLI nach Lockheed-Gleichung in Abhängigkeit von der kalten Wandtemperatur T_c (10 Lagen, $\bar{N} = 10\,\mathrm{Lagen/cm}$, $\varepsilon = 0{,}04$, $T_h = 293\,\mathrm{K}$).

T_c [K]	$\dot{q}_{\mathrm{solid}}$ [W/m²]	$\dot{q}_{\mathrm{rad}}$ [W/m²]	$\dot{q}_{\mathrm{total}}$ [W/m²]
4	1,24	0,33	1,57
77	0,93	0,33	1,26
150	0,61	0,32	0,93
200	0,40	0,30	0,70
250	0,18	0,26	0,44

7.1.6 UDF: Spacer

Die Spacer und die Rohre kontrahieren beim Einkühlen des Kryostaten und haben im Vakuum einen schwer darzustellenden thermischen Kontakt. Daher wurden die Vespel SP-1-Spacer nicht als Solid-Volumen aufgelöst, sondern als äquivalenter Wärmestrom auf den ausgeschnittenen Rohrkontaktflächen modelliert. Hier wird mit den Daten aus der Tabelle 2.3 gearbeitet und eine UDF erstellt.

Die Spacer haben alle unterschiedliche Geometrien. Die Außenkontaktfläche zwischen Spacer und Gehäuse wird als isotherm bei $293\,\mathrm{K}$ angenommen. Der Wärmeaustausch zwischen den Rohren über die internen Stege wird im ersten Ansatz vernachlässigt, da alle vier Rohre bei tiefen Temperaturen betrieben werden und der Temperaturunterschied zwischen Helium- und Moderator-Rohren klein gegenüber der Differenz zur Gehäuse-Wand ($293\,\mathrm{K}$) ist. Die Wärmeleitung wurde pro Rohr mit einem 1D-Wärmeleitpfad von der Vakuumaußenwand durch den Spacer zum Rohr modelliert. Dabei wurde für jedes Rohr an jedem Spacer ein effektiver Engstellenquerschnitt A_{eff} und eine effektive Pfadlänge L_{eff} ermittelt und mit der Formel 7.2 in einer UDF modelliert. Bei mehreren parallelen Pfaden durch den Spacer werden diese als Parallelschaltung von Wärmewiderständen zusammengefasst. L_{eff} und A_{eff} wurde in den CAD-Dateien der Spacer (s. Abb. **7**-4 und **7**-4a) gemessen. Der Beitrag von internen Rundungen zur effektiven Pfadlänge L_{eff} wurde geschätzt.

- Moderatorspacer **7**-3: Kühlgas: $L_{\mathrm{eff}} = 10\,\mathrm{mm}$, $A_{\mathrm{eff}} = 2 \cdot 2{,}5\,\mathrm{mm} \times 5\,\mathrm{mm} = 25\,\mathrm{mm}^2$, $A_{\mathrm{eff}}/L_{\mathrm{eff}} = 2{,}5\,\mathrm{mm}$
- Moderatorspacer **7**-3: Moderatorgas: $L_{\mathrm{eff}} = 8\,\mathrm{mm}$, $A_{\mathrm{eff}} = 12{,}5\,\mathrm{mm} \times 5\,\mathrm{mm} = 62{,}5\,\mathrm{mm}^2$, $A_{\mathrm{eff}}/L_{\mathrm{eff}} = 7{,}81\,\mathrm{mm}$
- Helium **7**-4a: $L_{\mathrm{eff}} = 20\,\mathrm{mm}$, $A_{\mathrm{eff}} = 4 \cdot 1\,\mathrm{mm} \times 5\,\mathrm{mm} = 20\,\mathrm{mm}^2$, $A_{\mathrm{eff}}/L_{\mathrm{eff}} = 1{,}0 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}$
- Helium-Einlass **7**-4b: $A_{\mathrm{eff}_1}/L_{\mathrm{eff}_1} = 2{,}0 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}$, $A_{\mathrm{eff}_2}/L_{\mathrm{eff}_2} = 2{,}58\,\mathrm{mm}$, $A_{\mathrm{eff}_{\mathrm{ges}}}/L_{\mathrm{eff}_{\mathrm{ges}}} = 4{,}58\,\mathrm{mm}$

$$\dot{q}''_{\mathrm{Spacer}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{Spacer}}}{A_{\mathrm{Kontakt}}} = \frac{A_{\mathrm{eff}}}{L_{\mathrm{eff}} \cdot A_{\mathrm{Kontakt}}} \int_{T_{\mathrm{Wand}}}^{T_{\mathrm{VA}}} k(T)\, dT \tag{7.2}$$

Für das Aufbringen der Spacer-Wärmeeintrage wurden auf den Helium- und Methan-Leitungen Flächen mit in Flussrichtung $5\,\mathrm{mm}$ länge und $6\,\mathrm{mm}$ breite in der Zeichenebene aufgebracht. Dabei wurde in der Berechnung die verschiedenen Radien der Rohre beachtet. Die in der UDF errechneten Wärmeeinträge werden über die Kontaktfläche zu einem Wärmestrom umgerechnet und auf diesen Kontaktzonen als positver Wärmestrom aufgebracht. Die Entscheidung, diese Wärmepatches einseitig auf die Leitungen

aufzubringen basiert auf der Moderatorspacergeometrie (s. **7**-4a). Durch die eingezeichneten Wärmepfade kann man sehen, dass diese nicht gleichmäßig um den Rohrumfang verteilt in das System eingebracht wird. Da bei der genutzen Randbedingung der Wärmestrom nicht ortabhängig innerhalb einer Kontaktfläche variiert werden kann, wurde mit Kontaktzonen (s. Abb. **7**-8) unten an den Leitungen versucht die Spacer einheitlich, aber möglichst nahe an der realen Geometrie darzustellen.

Die Kontaktwiderstände an den Auflageflächen der Spacer werden nicht berücksichtigt. Im Vakuum sind die Kontaktwiderstände stark vom Anpressdruck, der Oberflächenrauheit und der differenziellen Wärmeausdehnung der verwendeten Materialien im Vergleich zu Vespel SP-1 abhängig. Die Bestimmung der Wärmeströme über den Volumenwiderstand der Spacer ist ein eher konservativer Ansatz. Der reale Wärmeeintrag ist aufgrund der hier nicht zusätzlich modellierten Kontaktwiderstände tendenziell geringer.

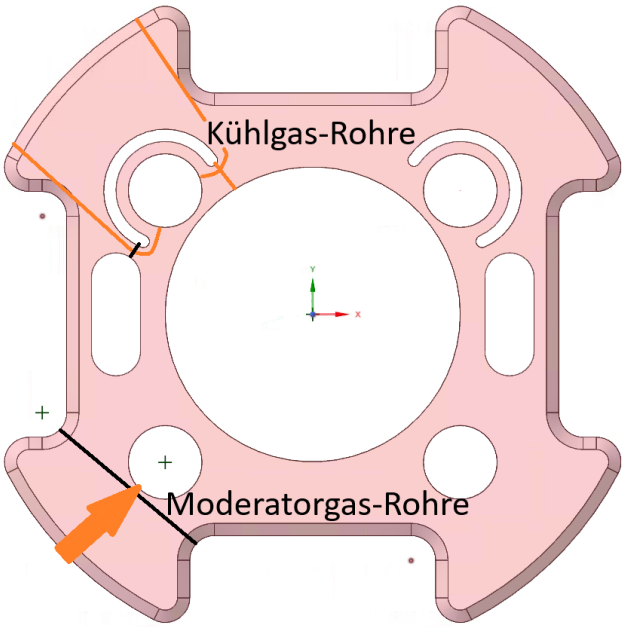
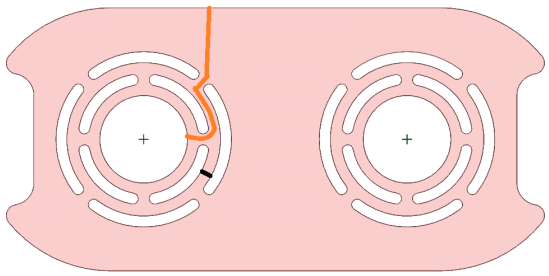
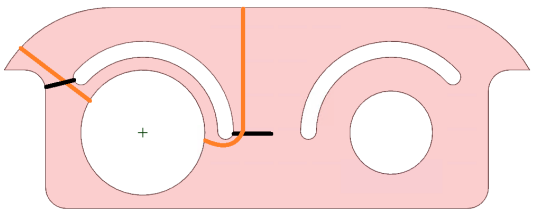


Abbildung **7**-3: CAD: Spacergeometrie am Moderator (effektive Pfadlänge: orange, Engstellenquerschnitt: schwarz, oben für Heliumleitungen 2 parallele Wärmepfade)



(a) CAD: Spacergeometrie an den Helium-Leitungen (Eingezeichneter Wärmepfad für die berechnung als 4 parallele Wärmepfade mit 1mm dicke)



(b) CAD: Spacergeometrie am Insert für die Helium-Einlass-Leitungen (2 parallele Wärmepfade, mittlerer Steg ist geteilt)

Abbildung **7**-4: CAD: Spacergeometrien an den Helium-Leitungen (effektive Pfadlänge: orange, Engstellenquerschnitt: schwarz)

7.1.7 Mesh

Die Geometrie des Kryostaten wird für die Simulation vereinfacht (s. Abb. **7**-5 und **7**-6). Dies geht aus den vorherigen Kapiteln hervor. Im Modell sind die in den Abbildungen **7**-5 und **7**-6 gezeigten Rohre, Moderatorgeometrie, Befestigungsplatten und die internen Volumina des Kühl- und Moderatorgases enthalten.

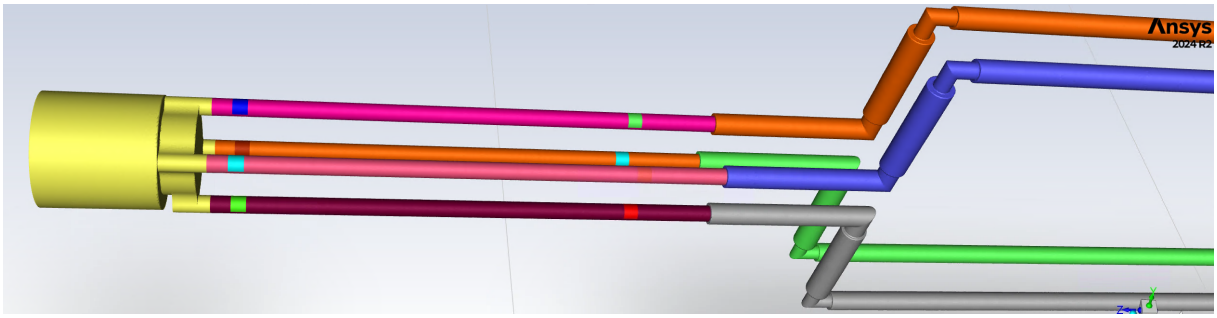


Abbildung **7**-5: Simulationsgeometrie: Moderatorgeometrie, erzeugt aus der CAD-Zeichnung von A. Schwab [37] (auf den eingefärbten kleinen Kontaktflächen werden die RB für die Spacer aufgebracht)

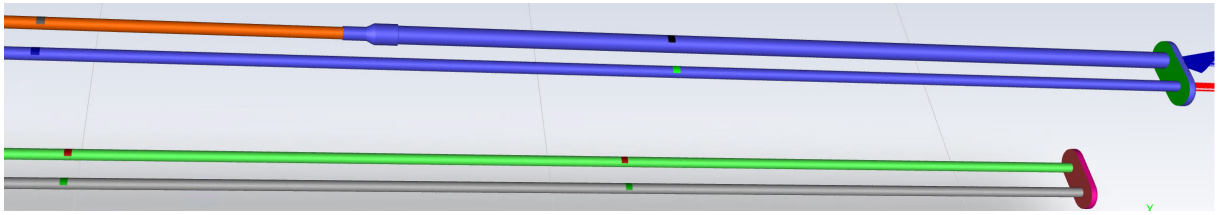


Abbildung **7**-6: Simulationsgeometrie: Gasleitungen mit Hüllrohr am Kühlgas-Einlass erzeugt aus der CAD-Zeichnung von A. Schwab [37] (auf den eingefärbten kleinen Kontaktflächen werden die RB für die Spacer aufgebracht)

Die Geometrie wurde aus der originalen CAD-Zeichnung abgeleitet. Die Rohre wurden geometrisch angepasst, sodass das Modell weniger Wechsel zwischen den Radien der Rohre hat, um die scharfen Kanten an den Übergängen der Radien, zugunsten der Meshqualität aus dem Modell zu entfernen. Die Rohrabschnitte wurden zusammengefasst zu insgesamt gleich langen zusammenhängenden Durchmesser-Sektionen.

Zielwerte für das Mesh:

Tabelle 7.2: Mesh-Qualitäts-Zielwerte für die CFD-Simulation des Kryostaten.

Metrik	**Idealbereich**	**Akzeptabel**	**Kritisch**	**Zielwert**
Skewness (max)	$< 0{,}50$	$< 0{,}85$	$> 0{,}95$	$< 0{,}85$
Skewness (mittel)	$< 0{,}20$	$< 0{,}30$	$> 0{,}40$	$< 0{,}25$
Orthogonal Quality (min)	$> 0{,}70$	$> 0{,}15$	$< 0{,}05$	$> 0{,}15$
Orthogonal Quality (mittel)	$> 0{,}95$	$> 0{,}85$	$< 0{,}70$	$> 0{,}90$
Aspect Ratio (max, Bulk)	< 100	< 500	> 1000	< 500
Aspect Ratio (max, Grenzschicht)	< 100	< 1000	> 5000	< 1000

Erstes Mesh mit Workbench-Meshing-Tool

Die Erstellung des ersten Meshes mit dem Meshing-Tool der ANSYS-Workbench ergibt eine nicht akzeptable orthogonale Qualität von $5{,}40039 \cdot 10^{-3}$ und ein Ab-messungsverhältnis von $2536{,}63$. Ursache hierfür sind scharfe Kanten in der mäanderförmigen Geometrie innerhalb der Moderatorgeometrie. In dem Meshing-Tool sind die anwendbaren Methoden begrenzt. Daher wird zu dem Meshing-Tool von ANSYS Fluent gewechselt.

Zweites Mesh mit Fluent-Meshing-Tool

Die maximale Elementgröße des Meshes wurde von 4 cm auf 1 cm verringert, da im vorherigen Mesh an mehreren Rohr-Stellen lange dünne Meshzellen[1] erzeugt wurden. Die Oberflächenmesh-Optionen wurden in Fluent-Meshing auf die Elementgröße $0{,}5\,\mathrm{mm}$ für die Mäandergeometrie in der Moderatorgeometrie angepasst. Diese lokale Verfeinerung des Oberflächen-Meshs verfolgt drei Ziele:

1. Eine ausreichend genaue geometrische Wiedergabe der scharfen Innenkanten und Krümmungen, da diese andernfalls zu degenerierten Mesh-Zellen führen würden.

2. Eine ausreichende Auflösung der charakteristischen Strömungsstrukturen in gekrümmten Kanälen, insbesondere der Dean-Wirbel[2] und der lokalen Strömungsablösungen an Innenkanten der Mäander.

3. Eine genaue Erfassung der konvektiven Wärmeübertragung der primären Wärmetauschfläche (Innenwand der mäanderförmigen Helium-Wärmetauscher-Geometrie innerhalb der Moderatorgeometrie), an der die größten lokalen Temperaturgradienten auftreten.

Das Surface Mesh erreicht hier eine maximale Skewness von $0{,}55$ und eine durchschnittliche Skewness von $0{,}033$. Die maximale Skewness liegt damit im akzeptablen Bereich (s. Tab. 7.2), die mittlere Skewness deutlich unterhalb des Idealbereichs von $0{,}20$. Ergebnisse für das Volume Mesh: Das Volumenmesh erfüllt alle in Tab. 7.2 definierten Qualitätszielwerte, wie der Vergleich in Tab. 7.3 zeigt. Tab. 7.4 gibt die vollständigen Kennwerte des finalen Netzes mit Minimum, Mittelwert und Maximum aller Metriken bei einer Gesamtzellzahl von $4\,410\,760$ an.

[1] *Collapsed Cells* oder *Degenerate Cells*: Degenerierte Meshzellen, die entstehen, wenn die Elementgröße in langen, schlanken Geometrien (wie Rohren) nicht optimal angepasst ist. Dies führt zu starken Verzerrungen und kann die Konvergenz und Genauigkeit der Simulation beeinträchtigen.

[2] Die in gekrümmten Rohren auftretenden Dean-Wirbel sind gegenläufige Wirbelpaare, die durch das Zusammenspiel von Zentrifugalkraft und viskosen Kräften entstehen. Sie werden durch die dimensionslose Dean-Zahl $De = Re \cdot \sqrt{r/R}$ charakterisiert, wobei Re die Reynolds-Zahl, r den Rohrradius und R den Krümmungsradius bezeichnet. Dean-Wirbel erhöhen den Wärmeübergang und den Druckverlust gegenüber geraden Rohrabschnitten [11].

Tabelle 7.3: Vergleich der Mesh-Qualitätsanforderungen mit dem erreichten Volumenmesh.

Metrik	**Zielwert**	**Erreicht**	**Bewertung**
Skewness (max)	$< 0{,}85$	$0{,}798$	✓
Skewness (mittel)	$< 0{,}25$	$0{,}063$	✓
Orthogonal Quality (min)	$> 0{,}15$	$0{,}201$	✓
Orthogonal Quality (mittel)	$> 0{,}90$	$0{,}934$	✓
Aspect Ratio (max)	< 500	$27{,}477$	✓
Aspect Ratio (mittel)	—	$3{,}63$	✓

Tabelle 7.4: Mesh-Qualitätswerte des finalen Volumenmeshes.

Metrik	**Minimum**	**Mittelwert**	**Maximum**
Skewness (Volume)	$2{,}8 \cdot 10^{-8}$	$0{,}063$	$0{,}798$
Skewness (Surface)	$1{,}1 \cdot 10^{-16}$	$0{,}004$	$0{,}866$
Orthogonal Quality (Volume)	$0{,}201$	$0{,}934$	$0{,}999$
Aspect Ratio (Volume)	$1{,}344$	$3{,}630$	$27{,}477$
Aspect Ratio (Surface)	$1{,}000$	$3{,}382$	$22{,}085$
Gesamtzellzahl: $4\,410\,760$			
Gesamtanzahl Surface Faces: $914\,678$			
Isolierte Zellen: 0			

7.2 Simulationen und Simulationsergebnisse

7.2.1 Umsetzung des $10\,\mathrm{K}$ Arbeitspunktes in der Simulation

Der in Messung 2 beobachtete $10\,\mathrm{K}$ Arbeitspunkt des Kryostaten soll in der Simulation reproduziert werden. Dabei muss eine grundlegende Herausforderung gelöst werden: Das Nadelventil im Transferheber entkoppelt den Druck der Gasphase im Dewar von dem Druck in den Kühlmittelleitungen des Moderator-Plugs. Dies geschieht durch die Begrenzung des Massenstroms durch das Nadelventil. Dadurch entsteht ein Druckabfall am Nadelventil, an dem das Helium verdampft. Da der Druck stromaufwärts des Ventils höher ist, wird verhindert, dass das Zweiphasengemisch aus Gas und Flüssigkeit in den Dewar zurückgedrückt wird. Dieser physikalische Mechanismus lässt sich in der Simulation nicht direkt abbilden.

Eine mögliche Option für einen stabilen und realitätsnahen Modellaufbau sieht einen mass-flow-inlet am Kühlmittel-Einlass und einen pressure-outlet am Auslass vor, da der Druck bei pt3 als Gegendruck des Auslasses angenommen werden kann. Die Option eines mass-flow-outlets am Kühlmittel-Auslass und eines pressure-inlets am Kühlgas-Einlass ist eine weitere Option. In diesem Fall ist der Druckabfall am Nadelventil des Transferhebers allerdings eine unbekannte Variable.

Aus den drei längeren Messungen werden bei der Betriebspunktanalyse die Betriebspunkte bei $10\,\mathrm{K}$ mit einem durchschnittlichen Sollwert $\mathrm{MFC_{He}}$ von ca. $14\,\%$ entnommen. Damit wird mit dem Maximalwert des $\mathrm{MFC_{He}}$ von $0{,}6\,\mathrm{g/s}$ der Betriebspunkt von $0{,}084\,\mathrm{g/s}$ errechnet und in die Simulation eingesetzt.

7.2.2 Erstes Ergebnis

Tab. 7.5 zeigt die Ergebnisse der ersten Simulation. Der Massenbilanz-Fehler von $0{,}096\,\%$ bestätigt die numerische Konvergenz. Mit $71{,}6\,\%$ dominiert die Festkörperleitung über die Rohrverbindungen den Gesamtwärmeeintrag von $16{,}929\,\mathrm{W}$, gefolgt von den Vespel-Spacern mit $19{,}8\,\%$. Die MLI-Strahlung trägt mit $7{,}2\,\%$ vergleichsweise wenig bei. Die Erwärmung des Heliums von $\Delta T_{\mathrm{He}} = 5{,}41\,\mathrm{K}$ ist im Vergleich zu den Messdaten zu hoch, was auf eine Überschätzung des Wärmeeintrags durch die Spacer-UDF hindeutet.

Daher wird die UDF für die nächste Simulation angepasst. Die Wärmeleitfähigkeit

Tabelle 7.5: Erste Simulationsergebnisse des Kryostaten im Betriebspunkt $10\,\mathrm{K}$ bei einem Helium-Massenstrom von $0{,}08\,\mathrm{g/s}$ (Iteration 4020).

Kategorie	**Größe**	**Wert**	**Einheit**
Massenströme	Helium-Inlet	$0{,}080$	g/s
	Helium-Outlet	$0{,}080$	g/s
	Massenbilanz-Fehler	$0{,}096$	%
Helium-Pfad	Temperatur Einlass (LakeShore-Sensor)	$7{,}98$	K
	Temperatur Auslass (LakeShore-Sensor)	$13{,}39$	K
	Erwärmung ΔT_{He}	$5{,}41$	K
Methan-Pfad	Temperatur Einlass	$61{,}16$	K
	Temperatur Auslass	$61{,}77$	K
	Differenz $\Delta T_{\mathrm{CH_4}}$	$0{,}61$	K
Oberflächen-$\varnothing$-temperaturen (Alu-Rohre)	Sensor 1 (He-Bereich, kalt)	$6{,}91$	K
	Sensor 2 (He-Bereich)	$12{,}48$	K
	Sensor 3 (CH_4-Bereich)	$96{,}73$	K
	Sensor 4 (CH_4-Bereich)	$96{,}82$	K
Wärme-einträge	Festkörperleitung Rohrverbindungen	$12{,}124$	W
	Spacer (Vespel SP-1, gesamt)	$3{,}355$	W
	MLI-Strahlung (gesamt)	$1{,}213$	W
	Sonstige Strahlung	$0{,}237$	W
	Gesamtwärmeeintrag	**16.929**	**W**
Anteile am Gesamt-wärmeeintrag	Festkörperleitung Rohrverbindungen	$71{,}6$	%
	Spacer	$19{,}8$	%
	MLI-Strahlung	$7{,}2$	%
	Sonstige Strahlung	$1{,}4$	%

der obenliegenden Spacerkontakte wird in der UDF auf $50\,\%$ reduziert, da diese aufgrund thermischer Kontraktion und der Vakuumumgebung einen erhöhten thermischen Kontaktwiderstand aufweisen, der auf diese Weise in der Simulation berücksichtigt wird.

Die UDF stellt den Wärmetransport zwischen den Methan- und Helium-Leitungen in den Spacern nicht dar. Zudem stimmen die Spacerpositionen und Temperatursensorpositionen in der Simulation nicht mit den realen Spacerpositionen und Temperatursensorpositionen überein. Dies liegt daran, dass die Spacer nicht fest an den Leitungen installiert sind und beim Aufschieben der Aluminiumhülle verschoben werden. Die Temperatursensoren sind nicht in dem CAD-Modell eingezeichnet. Die Position der Temperatursensoren selbst auf dem Rohr ist allerdings nicht der entscheidende Aspekt. Die Position relativ zum Spacer ist interessant.

In den Abbildungen **7**-7, **7**-8 und **7**-9 kann die Wärmeleitung des Systems betrachtet werden. Die Rohre sind wärmer als das Helium und speziell an den Spacern beträgt der Unterschied mehrere Kelvin. In der Abbildung **7**-8 ist zu erkennen, dass $10\,\mathrm{mm}$ bereits $1\,\mathrm{K}$ Temperaturunterschied für den Sensor bewirken kann. Daher ist das Ziel der nächsten Simulation die Sensorpunkte gleich weit entfernt von den Spacern zu platzieren und das ΔT_{He} zwischen $\mathrm{He_{in}}$ und $\mathrm{He_{out}}$ möglichst gut an die Messwerte anzupassen.

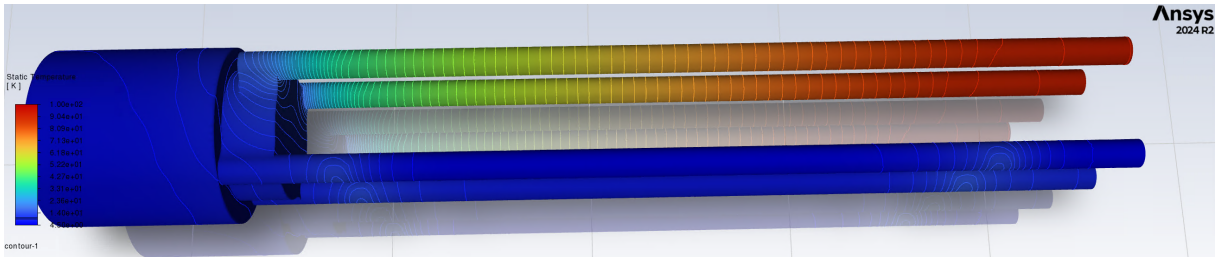


Abbildung **7**-7: Kontour: Temperatur der Moderatorgeometrie (links), Spacer, Methanzuleitung (oben-oben), Methanrückleitung (oben), Heliumzuleitung (unten) und Heliumrückleitung (unten-unten)

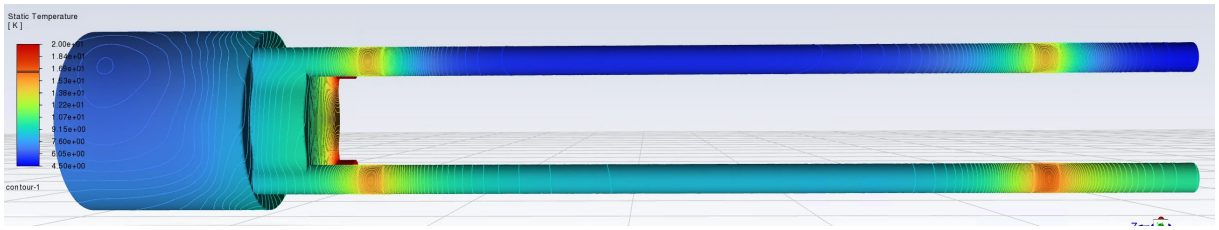


Abbildung **7**-8: Kontour: Temperatur der Moderatorgeometrie (links), Spacer (Hotspots), Heliumzuleitung (oben) und Heliumrückleitung (unten)



Abbildung **7**-9: Kontour: Querschnitt Temperatur der Heliumzuleitung (links) und Heliumrückleitung (rechts) $10\,\mathrm{mm}$ vor der Moderatorgeometrie

7.2.3 Erweiterung der Spacer-UDF um Wärmeleitung zwischen den Rohren (V2)

Die erste Version der Spacer-UDF lieferte gegenüber den Messwerten zu hohe Temperaturdifferenzen im Heliumpfad sowie zu hohe Wandtemperaturen der Methanleitungen. Dies führte zu der Überlegung, dass die Wärmeleitung zwischen den vier Rohranschlüssen *innerhalb* des Spacers im Modell bislang fehlte. Eine überschlägige Berechnung bestätigte, dass dieser Pfad einen nicht vernachlässigbaren Anteil am gesamten Wärmeeintrag hat.

Daraufhin wurde die Spacer-UDF dahingehend erweitert, dass neben dem bisherigen Hauptpfad (Gehäuse $\rightarrow$ Rohrwand) nun auch die Wärmeleitung zwischen den Rohren durch den Spacer-Körper berücksichtigt wird. Der gesamte Wärmestrom auf ein Rohr ergibt sich damit zu:

$$\dot{Q}_{\mathrm{ges}} = \dot{Q}_{\mathrm{Haupt}}(T_{\mathrm{Rohr}}) + \sum_{j} \dot{Q}_{\mathrm{Steg},j}(T_{\mathrm{Rohr}}, T_j) \tag{7.3}$$

Da die Steg-Anteile von den aktuellen Wandtemperaturen der benachbarten Rohre T_j abhängen, werden diese durch eine zusätzliche `DEFINE_ADJUST`-Funktion in der UDF zu Beginn jeder Iteration flächengewichtet aktualisiert und mit dem Unterrelaxationsfaktor $\alpha = 0{,}3$ stabilisiert. Die berücksichtigten Wärmeleitpfade durch den Spacer sind in Abbildung **7**-10 dargestellt.

Tabelle 7.6: Simulationsergebnisse des Kryostaten im Betriebspunkt $10\,\mathrm{K}$ bei einem Helium-Massenstrom von $0{,}084\,\mathrm{g/s}$ (Iteration 2002).

Kategorie	**Größe**	**Wert**	**Einheit**
Massenströme	Helium-Inlet	$0{,}084$	g/s
	Helium-Outlet	$0{,}084$	g/s
	Massenbilanz-Fehler	$0{,}339$	%
Helium-Pfad[a]	Temperatur Einlass Moderator	$9{,}688$	K
	Temperatur Auslass Moderator	$10{,}102$	K
	Erwärmung ΔT_{He}	$0{,}414$	K
	Temperatur Moderatorbehälter	$7{,}777$	K
Methan-Pfad[a]	Temperatur Einlass (LakeShore)	$23{,}671$	K
	Temperatur Auslass (LakeShore)	$22{,}494$	K
Anschluss-platten	He-Auslass Anteil	$12{,}149$	W
	He-Einlass Anteil	$0{,}050$	W
	CH_4-Anschlussplatte	$0{,}011$	W
	Gesamt	**12.210**	**W**
He-Spacer (Vespel SP-1)	Durchführung He-Einlass	$0{,}190$	W
	Durchführung He-Auslass	$0{,}431$	W
	Am Moderator (4 Spacer)	$1{,}038$	W
	Gesamt	**1.659**	**W**
CH_4-Spacer (Vespel SP-1)	Durchführung Radiation Shield	$0{,}110$	W
	Am Moderator (4 Spacer)	$0{,}940$	W
	Gesamt	**1.050**	**W**
Strahlung	MLI (Lockheed-Gleichung)	$1{,}344$	W
	Sonstige Strahlung	$0{,}212$	W
	Gesamt	**1.556**	**W**
Gesamtwärmeeintrag		**16.475**	**W**

[a] Die Messpunkte sind analog zum realen Aufbau als Temperatursensoren auf den Rohrwänden platziert und messen die jeweilige Wandtemperatur.

Tabelle 7.7: Aufschlüsselung des Wärmeeintrags in konstruktiv gewollten He-Auslass-Anteil und relevanten Wärmeeintrag in den Moderator.

Kategorie	**Größe**	**Wert**	**Einheit**
He-Auslass (konstruktiv gewollt)	Anschlussplatte He-Auslass	12,149	W
	He-Spacer Durchführung Auslass	0,431	W
	Gesamt	**12.580**	**W**
	Anteil am Gesamtwärmeeintrag	76,4	%
Relevanter Wärme-eintrag (Moderator)	Anschlussplatte He-Einlass	0,050	W
	CH_4-Anschlussplatte	0,011	W
	He-Spacer Durchführung Einlass	0,190	W
	He-Spacer am Moderator (4×)	1,038	W
	CH_4-Spacer gesamt	1,050	W
	Strahlung gesamt	1,556	W
	Gesamt	**3.895**	**W**
Gesamtwärmeeintrag (He-Auslass + Moderator)		**16.475**	**W**
Anteile am relevanten Wärme-eintrag	He-Spacer (Einlass + Moderator)	31,5	%
	CH_4-Spacer	27,0	%
	Strahlung (MLI + sonstig)	39,9	%
	Anschlussplatten He/CH_4-Einlass	1,6	%

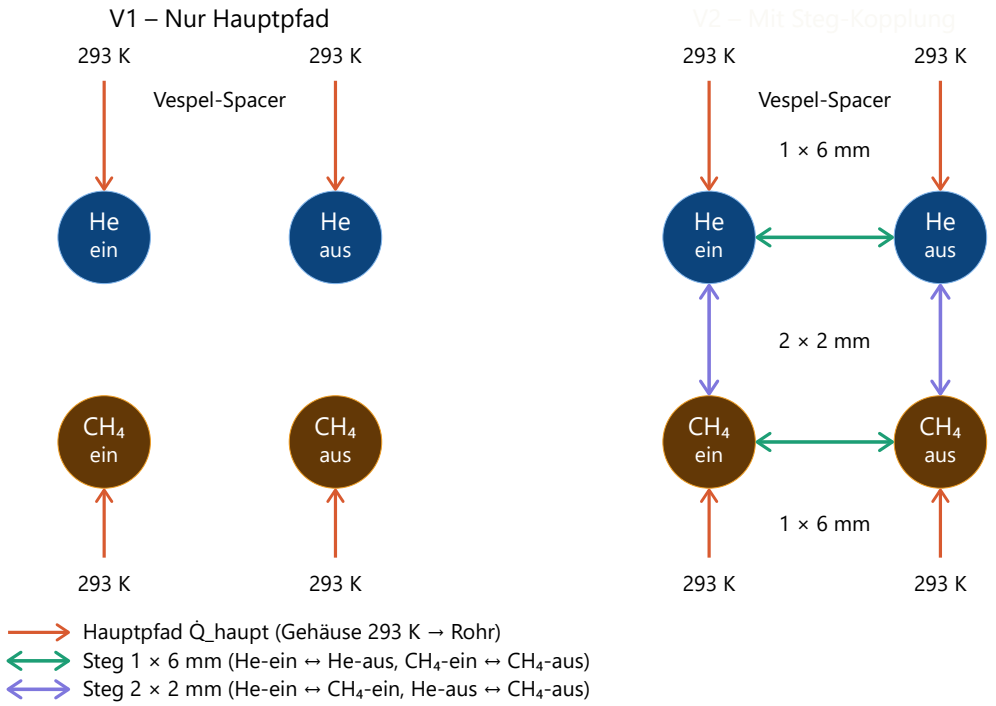


Abbildung **7**-10: Schema der UDF:Spacer Funktionalität (V1 links, V2 rechts, Spacer hat eine Tiefe von $5\,\mathrm{mm}$)

7.2.4 Zweites Ergebnis

Tab. 7.6 zeigt die Ergebnisse der zweiten Simulation mit der erweiterten Spacer-UDF (V2). Der Massenbilanz-Fehler von $0{,}339\,\%$ bestätigt die numerische Konvergenz. Die Helium-Erwärmung im Moderator beträgt $\Delta T_{\mathrm{He}} = 0{,}414\,\mathrm{K}$ und liegt damit deutlich näher an den Messwerten als in der ersten Simulation ($5{,}41\,\mathrm{K}$), was die Wirksamkeit der V2-UDF bestätigt. Die Sensortemperaturen am Moderator-Einlass und -Auslass liegen mit $9{,}688\,\mathrm{K}$ bzw. $10{,}102\,\mathrm{K}$ um ca. $2\,\mathrm{K}$ bis $3\,\mathrm{K}$ oberhalb der Moderatorbehältertemperatur von $7{,}777\,\mathrm{K}$, was auf den Wärmeeintrag der Spacer in unmittelbarer Sensornähe zurückzuführen ist.

Tab. 7.7 schlüsselt den Gesamtwärmeeintrag von $16{,}475\,\mathrm{W}$ in zwei Anteile auf. Mit $12{,}580\,\mathrm{W}$ ($76{,}4\,\%$) entfällt der größte Teil auf den He-Auslass, der konstruktiv bedingt eine direkte Festkörper- verbindung zur Außenwand bildet und den abströmenden Heliumstrom vorwärmt. Dieser Anteil ist daher kein parasitärer Wärmeeintrag in den Moderator. Der verbleibende relevante Wärmeeintrag in den Moderator beträgt $3{,}895\,\mathrm{W}$, wobei die Wärmestrahlung mit $39{,}9\,\%$ den größten Anteil stellt, gefolgt von den He-Spacern ($31{,}5\,\%$) und den CH_4-Spacern ($27{,}0\,\%$). Der Beitrag der Anschlussplatten am Einlass ist mit $1{,}6\,\%$ vernachlässigbar.

Die Kühlleistung des Heliums bei einer Einlasstemperatur von $4{,}5\,\mathrm{K}$, einem Massen-

strom von $0{,}084\,\mathrm{g/s}$ und einem Druck von ca. $1{,}25\,\mathrm{bar}$ zum Kühlen des Methans auf $7{,}777\,\mathrm{K}$ beträgt nach NIST-Daten ca. $1{,}81\,\mathrm{W}$. Aus den Simulationsdaten lässt sich die Wärmeaufnahme des Heliums entlang des Zuleitungspfades entnehmen: $0{,}277\,\mathrm{W}$ in der Edelstahl-Leitung und $0{,}519\,\mathrm{W}$ in der Aluminium-Leitung, sowie $1{,}257\,\mathrm{W}$ im Moderator-Wärmetauscher.

8 Fazit

In diesem kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengetragen und bewertet.

8.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die entwickelte Automatisierung erfüllt alle definierten Betriebsziele. Der Kryostat kann aus dem Warmzustand durch einen einzelnen Startvorgang in Betrieb genommen werden. Durch die Optimierung der Betriebsparameter konnte die Zeit bis zum Erreichen des $10\,\mathrm{K}$-Betriebspunkts von $140\,\mathrm{min}$ auf $55\,\mathrm{min}$ reduziert werden; gleichzeitig sank der Heliumverbrauch bis zum Betriebspunkt um $16\,\%$. Das implementierte mehrstufige Regelkonzept – bestehend aus einer Abkühlphase mit initalem Regler und einem angepassten Tieftemperaturregler – steigert die Regelgüte deutlich. Im eingeschwungenen $10\,\mathrm{K}$-Betrieb ist die Regelstabilität so hoch, dass ein großer Teil der verbleibenden Schwankungen im Temperatursignal auf das Sensorrauschen zurückzuführen sind. Durch implementierte Sicherheitsfunktionen wird der Kryostat bei Überschreitung kritischer Grenzwerte automatisch in einen sicheren Betriebszustand überführt, wodurch sowohl der Einweisungsaufwand für Bedienpersonal als auch das Risiko einer Gerätebeschädigung reduziert wird.

Die Simulation bildet das Systemverhalten mit einer Abweichung von unter $5\,\%$ gegenüber den Messdaten ab und ermöglicht Einblicke in interne Prozesse, die messtechnisch nicht zugänglich sind. Insbesondere zeigt die Simulation, dass die Temperatur im Moderatorbehälter um mehr als $2\,\mathrm{K}$ (s. Tab. 7.6) unterhalb der Sensortemperatur liegt – ein Effekt, der durch die Wärmeleitung über die Rohrwände bedingt ist und verdeutlicht, dass die vorhandene Sensorik die tatsächliche Temperatur des erstarrten Moderatorgases nur eingeschränkt abbilden kann.

Die Simulation weist methodische Grenzen auf: Die Phasenübergänge des Heliums werden nicht modelliert, da diese durch eine angepasste Betriebsführung – vollständige Verdampfung vor Eintritt in den Kryostaten – in der Praxis vermieden werden. Das Erstarrungsverhalten des Methans konnte aufgrund des stationären Berechnungsansatzes nicht abgebildet werden; eine transiente Simulation war aufgrund unzureichender Materialdaten für Dichte und spezifische Wärmekapazität nicht realisierbar. Für zukünftige geometrische Änderungen des Moderatorbehälters und der Moderatorgeometrie

steht mit der validierten Simulation ein geeignetes Werkzeug zur Verfügung.

Tab. 8.1 gibt eine Übersicht aller definierten Arbeitsziele und deren Erfüllungsgrad. Die nicht erfüllten Simulationsziele – Phasenübergang des Heliums, Erstarrungsverhalten des Methans sowie der Idle-Betrieb – sind auf die in Abschnitt 7.1.1 beschriebenen methodischen Grenzen des stationären Berechnungsansatzes und unzureichende Materialdaten zurückzuführen.

Tabelle 8.1: Übersicht der Arbeitsziele

Bereich	Ziel	Erfüllt
Automatisierung	Starten aus dem Warmzustand mit einem Befehl	✓
	Einstellbar für mehrere Moderatorgase (Start)	✓
	Wechselbar zwischen He und N_2 als Kühlmittel (Start)	✓
	Regelung für $10\,\mathrm{K}$ Methan	✓
	Sicherheitsabschaltung bei Fehlfunktion	✓
	Warnungen bei Messwertabweichungen	✓
	Optimierung der Betriebsparameter	✓
	Ausschalten mit einem Befehl	✓
Simulation	Simulation der Verschiebung des Phasenübergangs	-
	Verhalten des Moderatorgases bei der Erstarrung	-
	Optimierung des Heliumverbrauchs beim Startvorgang	✓
	Idle-Betrieb simulieren	-
	Verhaltensphasen simulieren	✓
	Übertragbarkeit auf andere Moderatorgase	✓
	Übertragungskennwerte ermitteln	✓
Erprobung	Erprobung der Automatisierung	✓
	Vergleich Simulationsdaten mit realem Verhalten	✓
	Übertragbarkeit zwischen Kühl- und Moderatorgasen	✓

8.2 Ausblick

Für zukünftig geplante Moderatorgeometrien ist vorgesehen, Temperatursensoren direkt am Moderatorgasbehälter anzubringen, deren Messwerte als Regelgröße für die Temperaturregelung dienen sollen. Die in dieser Arbeit identifizierte Diskrepanz zwischen Sensor- und Moderatortemperatur unterstreicht dabei den Nutzen dieser Erweiterung. Die validierte Simulation steht als Werkzeug zur Verfügung, um Optimierungen der neuen Geometrien vorab zu bewerten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde festgestellt, dass ein neuer Pumpstand zur Evakuierung der Moderatorgasleitung von Wasserstoff erforderlich ist. Zudem zeigte sich, dass die bestehende Drucksensorik für den Betrieb mit Wasserstoff und Kohlenwasserstoffen angepasst werden muss. Beide Maßnahmen sind für zukünftige Erweiterungen des Systems vorgesehen.

8.3 Anregungen für Verbessungen

Das größte Verbesserungspotenzial wird in der Anpassung der Spacergeometrie gesehen, da diese Bauteile mit vergleichsweise geringem Aufwand und niedrigen Kosten ausgetauscht werden können. Eine Möglichkeit besteht darin, die Spacer so zu gestalten, dass diese ausschließlich die Moderatorgasleitungen oder die Moderatorgasleitungen und die Kühlgasrückleitung umschließen. Diese geometrische Anpassung hätte folgende Auswirkungen:

- Die Fixierung der Moderatorgeometrie bleibt wie bisher gewährleistet
- Das Temperaturgefälle zwischen Spacer und Moderatorgeometrie wird verringert, da die Methanleitungen wärmer als die Heliumleitung sind
- Die Anzahl der Berührungspunkte und damit die Wärmeleitung durch den Spacer werden reduziert
- Die unteren Kontaktpunkte werden durch die Schwerkraft an die untere Vakuumhülle gedrückt und liegen dort weiter von der Moderatorgeometrie entfernt. Dadurch verlängert sich der Wärmepfad.
- Die Wärmeleitung zwischen Methan- und Heliumleitung wird eliminiert

Sofern eine Überarbeitung der Spacergeometrie ohnehin erfolgt, bietet sich zudem eine Reduzierung der Kontaktflächen zwischen Spacer und Außenhülle an. Die bestehenden Kontaktflächen von über $50\,\mathrm{mm}^2$ könnten durch mehrere kleine Kontaktpunkte ersetzt

werden, was bei entsprechender statischer Auslegung realisierbar ist und die Wärmeleitung weiter reduziert. Alternativ könnten die Bohrungen für die Rohre im Spacer geringfügig vergrößert werden, wodurch die Kontaktfläche erheblich verringert würde.

Eine weitere Verbesserungsoption ist die Nutzung der Heliumrückleitung zum Kühlen der Moderatorgasleitungen, um die verbleibende Kühlleistung des Heliums effizienter zu nutzen. Insbesondere die Heliumrückleitung an der Moderatorgasleitungsdurchführung im Moderator-Plug bietet hierfür Potenzial: Durch eine Wärmebrücke oder das Verschweißen der Leitungen kann der vollständige Leitungsweg genutzt werden, um die Moderatorgasleitungen zu kühlen und das Helium vor dem Verlassen des Kryostaten zu erwärmen. Dies würde voraussichtlich sowohl die Zeit zum Erreichen der Solltemperatur als auch die Kühleffizienz verbessern. Nachteilig ist jedoch der erhöhte Konstruktions- und Fertigungsaufwand für die betroffenen Komponenten.

Die Regelung würde nach einer geometrischen Änderung weiterhin funktionsfähig bleiben, jedoch könnten durch den veränderten Massestrom am Betriebspunkt Oszillationen auftreten. Eine Anpassung der Formel zur Ansteuerung des Transferhebers wäre in diesem Fall erforderlich, um das Regelverhalten zu stabilisieren. Hierfür wäre die Einführung eines anpassbaren Parameters sinnvoll, der vom Benutzer während des Betriebs kalibriert werden kann.

Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Ulrich Rücker, der mir dieses Thema ermöglicht und die Arbeit fachlich betreut hat. Seine Unterstützung hat maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Bei Prof. Dr. MBA Stefan Bergfeld bedanke ich mich für die Betreuung seitens der Fachhochschule sowie die konstruktiven Rückmeldungen während des gesamten Arbeitsprozesses.

Alexander Steffens danke ich für die Programmierung der Automatisierung und die damit verbundene enge Zusammenarbeit, ohne die die Umsetzung in dieser Form nicht möglich gewesen wäre.

Frank Suxdorf danke ich für die Programmierung der speicherprogrammierbaren Steuerung und die Unterstützung bei der technischen Umsetzung.

Micha Hölzle danke ich für die Beschaffung und Einrichtung des Simulationsrechners, ohne den die Durchführung der Simulation in diesem Umfang nicht möglich gewesen wäre.

Abschließend möchte ich mich beim Jülich Centre for Neutron Science (JCNS) für die gute Zusammenarbeit und die Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur bedanken.

Literaturverzeichnis

[1] *Auflistung kerntechnischer Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland*. Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung, 2023

[2] ALEFELD, B. ; CHRIST, J. ; KUKLA, D. ; SCHERM, R. ; SCHMATZ, W.: Neutronenleiter / Institut für Neutronenphysik und Physik-Department der Technischen Hochschule München. 1965. – Forschungsbericht

[3] ANSYS INC.: *Ansys Fluent Theory Guide*. Canonsburg, PA, USA: Ansys Inc., 2023. https://ansyshelp.ansys.com

[4] BACON, G. E.: *Neutron Physics*. London, Wykeham Publications, 1969

[5] BAUER, G. S.: Die Spallations-Neutronenquelle SINQ / Paul Scherrer Institut. Dezember 1992. – Forschungsbericht

[6] BESSLER, Y.: *Strömungsmechanische Simulation und experimentelleValidierung des kryogenen Wasserstoff-Moderators für die Europäische Spallationsneutronenquelle ESS*, Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Diss., 2020

[7] BRONKHORST HIGH-TECH B.V.: *Wie funktioniert ein Bypass Durchflussmesser?* https://www.bronkhorst.com/de/wissenscenter/bypass-durchflussmesser/. Version: 2025. – Abgerufen am 26.05.2026

[8] BRÜCKEL, T. ; GUTBERLET, T: ; BAGGEMANN, J. ; BÖHM, S. ; DOEGE, P. ; FENSKE, J. ; FEYGENSON, M. ; GLAVIC, A. ; HOLDERER, O. ; JAKSCH, S. ; JENTSCHEL, M. ; KLEEFISCH, S. ; KLEINES, H. ; LI, J. ; LIEUTENANT, K. ; MASTINU, P. ; MAUERHOFER, E. ; MEUSEL, O. ; PASINI, S. ; PODLECH, H. ; RIMMLER, M. ; RÜCKER, U. ; SCHRADER, T. ; SCHWEIKA, W. ; STROBL, M. ; VEZHLEV, E. ; VOIGT, J. ; ZAKALEK, P. ; ZIMMER, O.: Conceptual Design Report Jülich High Brilliance Neutron Source (HBS) / Jülich Center for Neutron Science. 2020. – Forschungsbericht

[9] BRÜCKEL, Th. ; ECKOLD, G. ; GRIEWATSCH, K. ; LINK, P. ; STEITZ, R. ; VOIT, A. ; ZABEL, H.: Perspektiven der Neutronenforschung in Deutschland im Licht der kommenden neuen Europäischen Neutronenquelle / Komitee Forschung mit Neutronen (KFN). 2011. – Forschungsbericht

[10] BÖHM, S. ; CRONERT, T. ; DABRÜCK, J.-P. ; FABRÈGES, X. ; GUTBERLET, T. ; MEZEI, F. ; LETOURNEAU, A. ; MENELLE, A. ; OTT, F. ; RÜCKER, U. ; TRAN, H. ; VOÏGT, J. ; ZAKALEK, P.: *Neutron Scattering Instrumentation at Compact Neutron Sources*. https://arxiv.org/abs/1809.02370. Version: 2018

[11] DEAN, W. R. ; HURST, J. M.: Note on the motion of fluid in a curved pipe. In: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 4 (1927), Nr. 20, 208–223. https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/C53740B97524473762A91F32F38E8781/S0025579300001947a.pdf

[12] DUPONT: *Vespel® SP-1 Polyimide Isostatic Shapes Datasheet*. Technical Datasheet VPE-A10861-00-B0614, 2014

[13] FESMIRE, J. E. u. a.: Cylindrical cryogenic calorimeter testing of six types of multilayer insulation systems. In: *Cryogenics* 89 (2018), S. 58–75

[14] FROLEC, Jiří ; KRÁLÍK, Tomáš ; MUSILOVÁ, Věra ; HANZELKA, Pavel ; SRNKA, Aleš ; JELÍNEK, Josef: A database of metallic materials emissivities and absorptivities for cryogenics. In: *Cryogenics* 97 (2019), S. 85–99. http://dx.doi.org/10.1016/j.cryogenics.2018.12.003. – DOI 10.1016/j.cryogenics.2018.12.003

[15] HOWELL, J. R. ; MENGÜÇ, M. P. ; DAUN, K. J. ; SIEGEL, R.: *Thermal Radiation Heat Transfer*. 7. CRC Press, 2021. – ISBN 978–0–367–34707–0

[16] IAEA: Neutron Generators for Analytical Purposes / International Atomic Energy Agency. Version: 2001. https://www.iaea.org/publications/6231/neutron-generators-for-analytical-purposes. Vienna, 2001 (1215). – IAEA-TECDOC

[17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: Cold Neutron Sources: Practical Considerations and Modern Research / International Atomic Energy Agency. Wien, 2023 (TECDOC-2025). – Forschungsbericht. – ISBN 978–92–0–139423–1

[18] KELLER, C. W. ; CUNNINGTON, G. R. ; GLASSFORD, A. P.: Thermal Performance of Multi-layer Insulations / Lockheed Missiles & Space Company. Version: 1974. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740014451/downloads/19740014451.pdf. 1974 (NASA CR-134477). – Forschungsbericht

[19] KRÁLÍK, Tomáš ; HANZELKA, Pavel ; MUSILOVÁ, Věra ; SRNKA, Aleš: Factors

influencing thermal radiative properties of metals. In: *arXiv preprint* (2016). https://arxiv.org/abs/1610.00915

[20] KRÁLÍK, Tomáš ; MUSILOVÁ, Věra ; HANZELKA, Pavel ; FROLEC, Jiří: Method for measurement of emissivity and absorptivity of highly reflective surfaces from 20 K to room temperatures. In: *Metrologia* 53 (2016), Nr. 2, 743–753. http://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/53/2/743. – DOI 10.1088/0026–1394/53/2/743

[21] LISKIEN, H. ; PAULSEN, A.: Neutron production cross sections and energies for the reactions ^{7}Li$(p,n)^{7}$Be and ^{3}H$(p,n)^{3}$He. In: *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 15 (1975), Nr. 1, S. 57–84. http://dx.doi.org/10.1016/0092-640X(75)90004-2. – DOI 10.1016/0092–640X(75)90004–2

[22] MANN, D. B. (Hrsg.): *LNG Materials and Fluids: A User's Manual of Property Data in Graphic Format*. First. Boulder, Colorado : National Bureau of Standards, Cryogenics Division, 1977

[23] MARQUARDT, E. D. ; LE, J. P. ; RADEBAUGH, Ray: Cryogenic Material Properties Database. In: *Proceedings of the 11th International Cryocooler Conference*. Keystone, CO, June 2000. – NIST, Boulder, CO

[24] MENTER, F. R.: Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. In: *AIAA Journal* 32 (1994), Nr. 8, S. 1598–1605. http://dx.doi.org/10.2514/3.12149. – DOI 10.2514/3.12149

[25] MEYER, D. W. ; HSIEH, W.-P. ; HSU, H. ; KUO, C.-Y. ; LIN, J.-F.: Thermal Conductivity and Compressional Velocity of Methane at High Pressure: Insights Into Thermal Transport Properties of Icy Planet Interiors. In: *Journal of Geophysical Research: Planets* 127 (2022), Nr. 3, e2021JE007059. http://dx.doi.org/10.1029/2021JE007059. – DOI 10.1029/2021JE007059

[26] MUSILOVÁ, Věra ; HANZELKA, Pavel ; KRÁLÍK, Tomáš ; SRNKA, Aleš: Low temperature radiative properties of materials used in cryogenics. In: *Cryogenics* 45 (2005), S. 529–536. http://dx.doi.org/10.1016/j.cryogenics.2005.05.001. – DOI 10.1016/j.cryogenics.2005.05.001

[27] NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION: *PubChem Compound Summary for CID 297, Methane*. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/297. Version: 2026. – Abgerufen am 26.05.2026

[28] NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION: *PubChem Com-*

pound Summary for CID 783, Hydrogen. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/783. Version: 2026. – Abgerufen am 26.05.2026

[29] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY: *Material Properties: Polyimide (Kapton) – Cryogenic Material Properties Database*. https://trc.nist.gov/cryogenics/materials/Polyimide%20Kapton/PolyimideKapton_rev.htm, . – Abgerufen am 06.05.2026

[30] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY: *NIST Chemistry WebBook SRD 69*. National Institute of Standards and Technology (NIST)

[31] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY: *Aluminum 5083-O (UNS A95083) – Cryogenic Material Properties*. NIST Cryogenic Material Properties Database, Material Measurement Laboratory. https://www.nist.gov/mml/acmd/aluminum-5083-o-uns-a95083. Version: 2018. – Aktualisiert 2021-06-02; abgerufen am 4. Mai 2026

[32] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY: *Stefan-Boltzmann constant*. https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?sigma. Version: 2026. – Abgerufen am 26.05.2026

[33] RINGS, R. T.: *Aufbau und Inbetriebnahme des Para-Wasserstoff-Kryostaten für die High Brilliance Neutron Source (HBS)*. 2023

[34] RULE, D. L. ; SMITH, D. R. ; SPARKS, L. L.: Thermal Conductivity of a Polyimide Film Between 4.2 and 300 K, With and Without Alumina Particles as Filler / National Institute of Standards and Technology. Boulder, CO, 1990 (NISTIR 3948). – Forschungsbericht

[35] RUNYAN, M. C. ; JONES, W. C.: Thermal Conductivity of Thermally-Isolating Polymeric and Composite Structural Support Materials Between 0.3 and 4 K. In: *Cryogenics* 48 (2008), S. 448–454. http://dx.doi.org/10.1016/j.cryogenics.2008.06.002. – DOI 10.1016/j.cryogenics.2008.06.002

[36] SCHLICHTING, Hermann ; GERSTEN, Klaus: *Grenzschicht-Theorie*. 10., überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006. http://dx.doi.org/10.1007/3-540-32985-4. http://dx.doi.org/10.1007/3-540-32985-4. – ISBN 978–3–540–23004–5

[37] SCHWAB, A.: *Design and Manufacturing of a Cryostat for a Compact Cryogenic Neutron Moderator for Operation at Temperatures below 10 K*. Aachen,

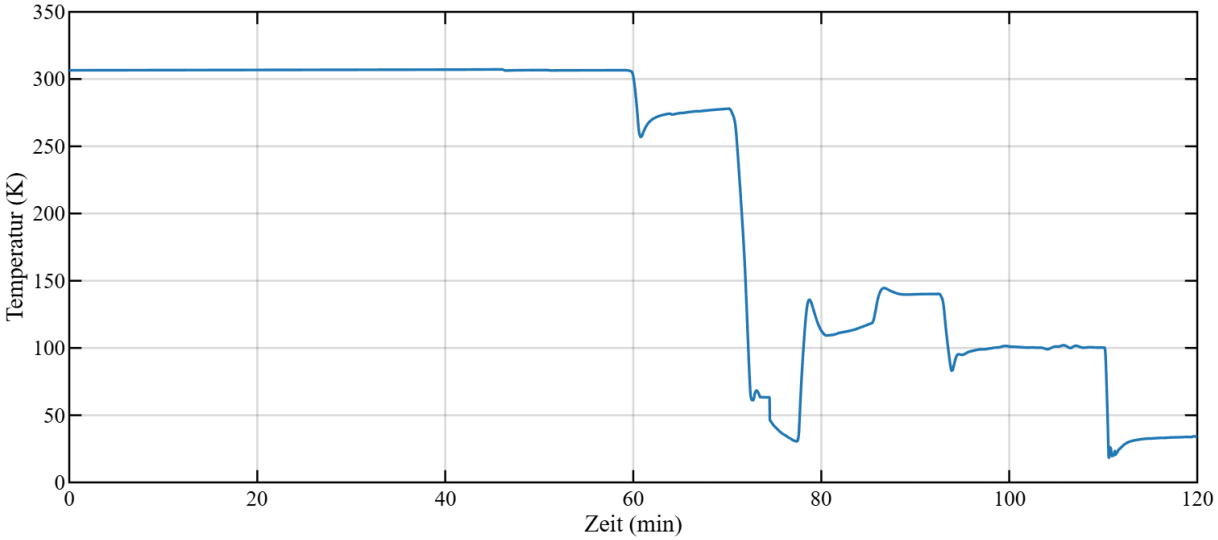
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, April 2024. https://juser.fz-juelich.de/record/1032121. – Tag der mündlichen Prüfung: 16.04.2024

[38] WOODCRAFT, A. L. ; GRAY, A.: A Low Temperature Thermal Conductivity Database. In: *AIP Conference Proceedings* Bd. 1185, 2009, S. 681–684

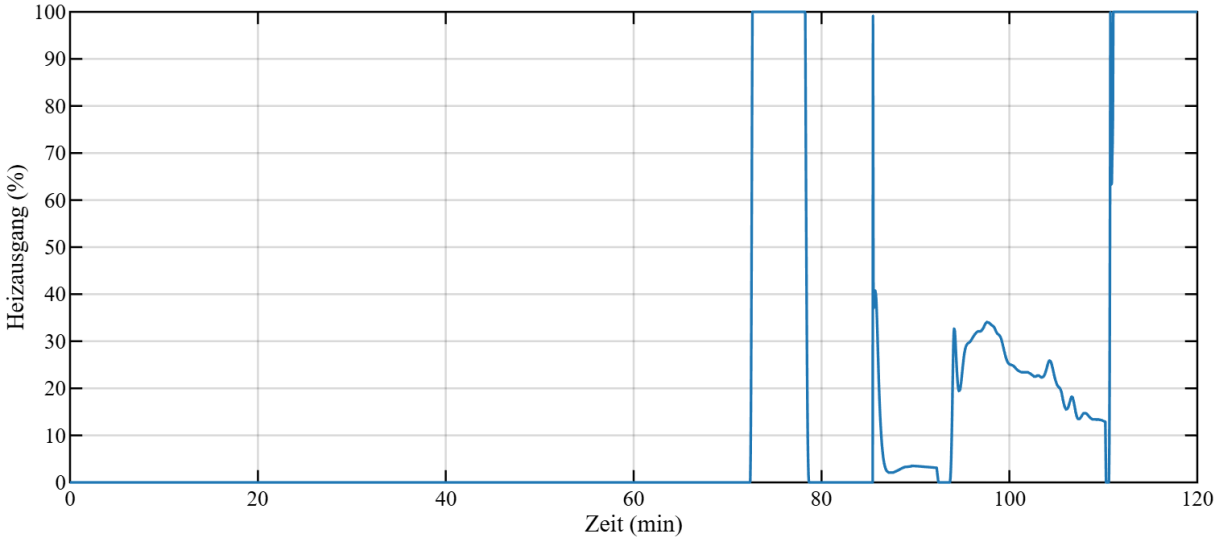
[39] ZAKALEK, P. ; BAGGEMANN, J. ; LI, J. ; RÜCKER, U. ; GUTBERLET, T. ; BRÜCKEL, T.: The JULIC Neutron Platform, a testbed for HBS. In: *EPJ Web of Conferences* 298 (2024), 05003. http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/202429805003. – DOI 10.1051/epjconf/202429805003

A Anhang 1: Messdaten

A.1 Test 1: Methan (mit Helium gekühlt)

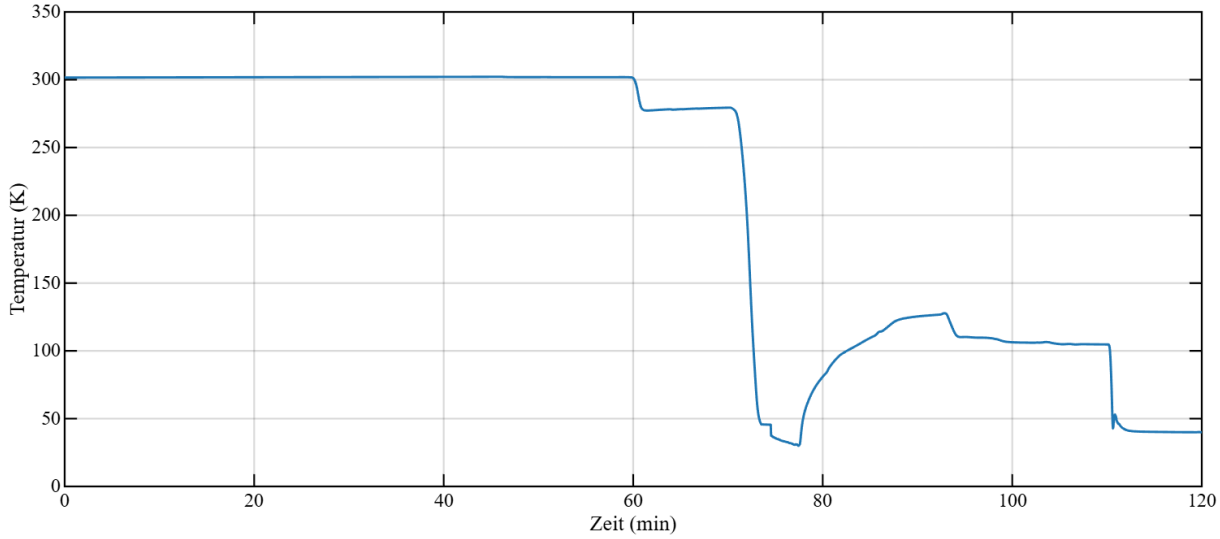


(a) Messung 1: Temperatursensor Eingang Kühlgas

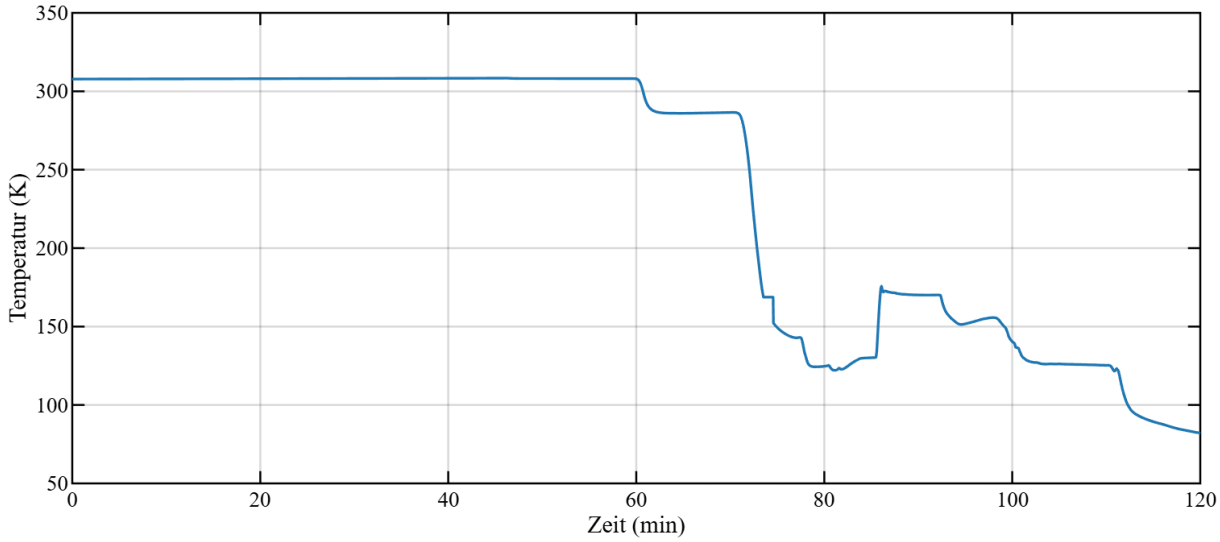


(b) Messung 1: Heizleitungs am Eingang Kühlgas

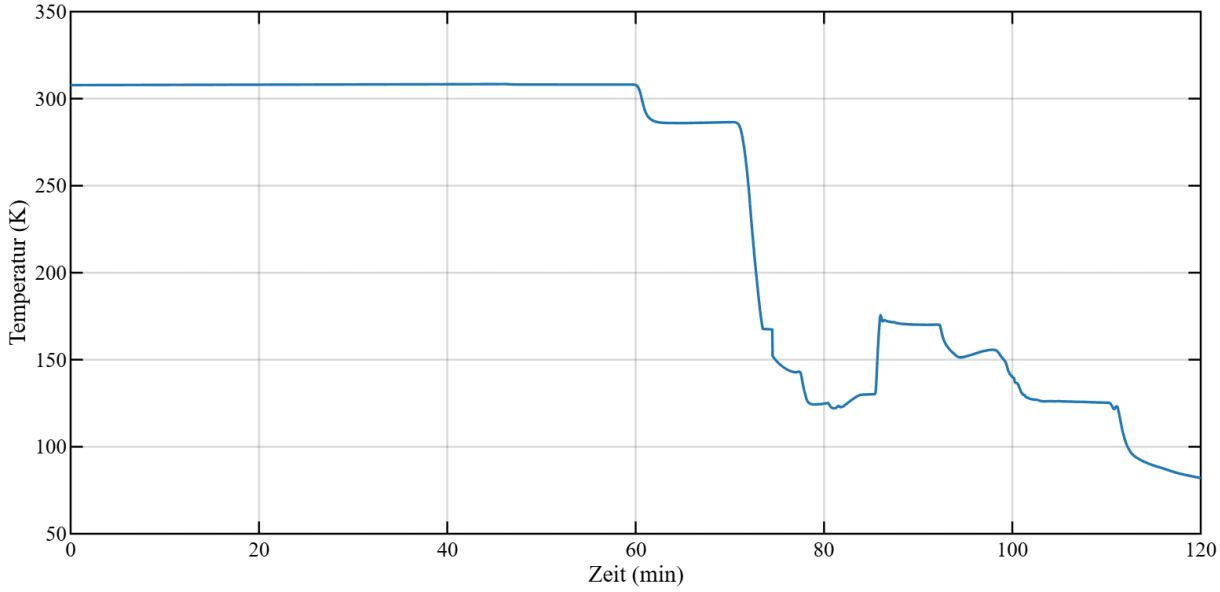
Messdaten – Seite 1/7



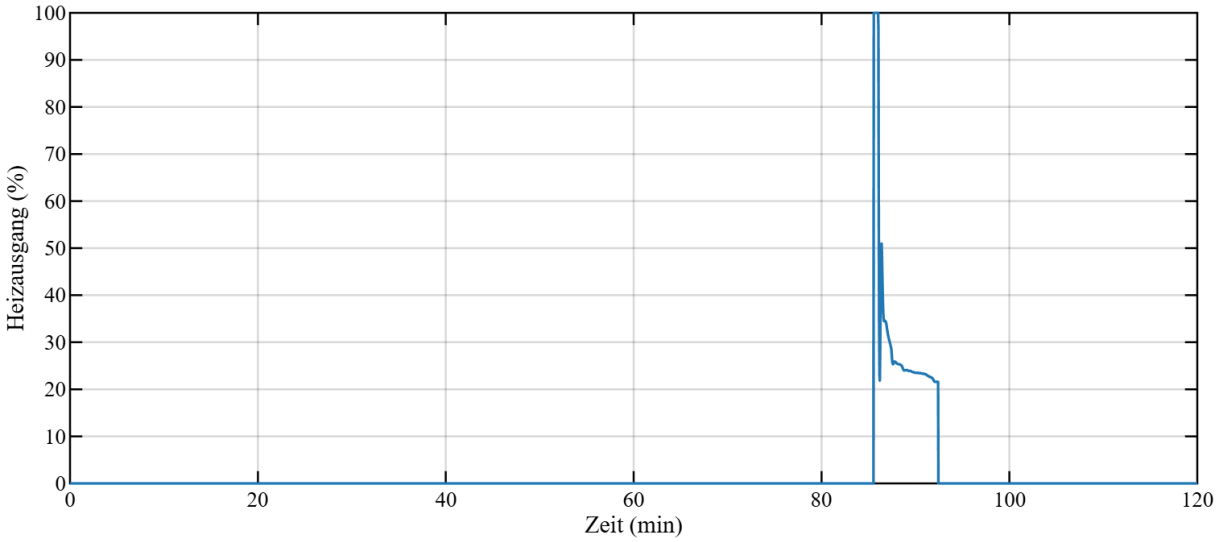
(a) Messung 1: Temperatursensor Ausgang Kühlgas



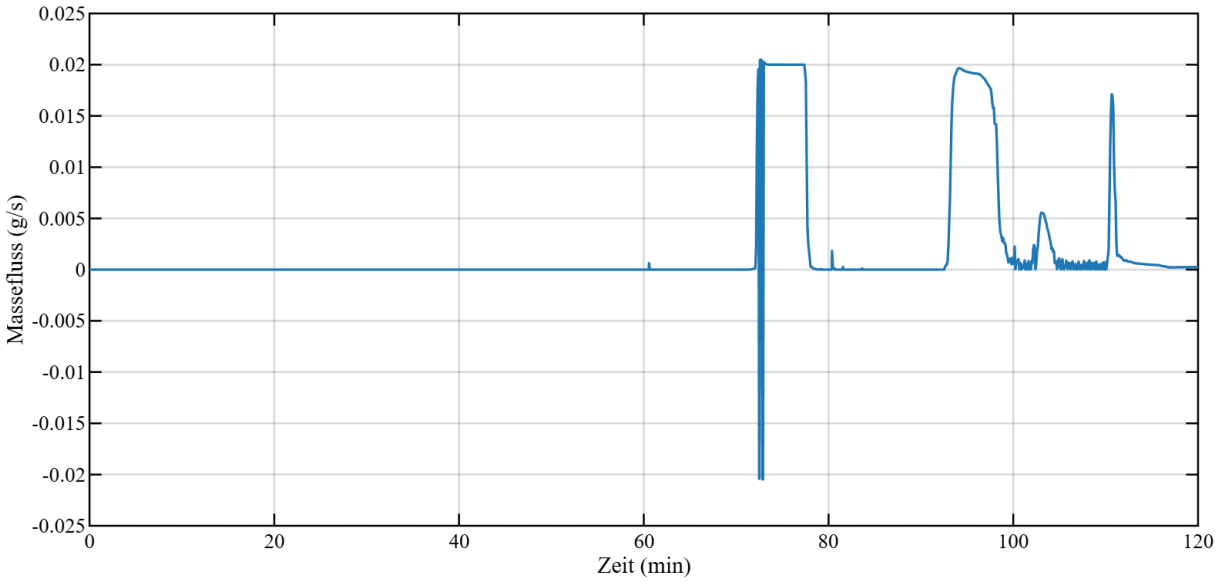
(b) Messung 1: Temperatursensor Eingang Moderatorbehälter



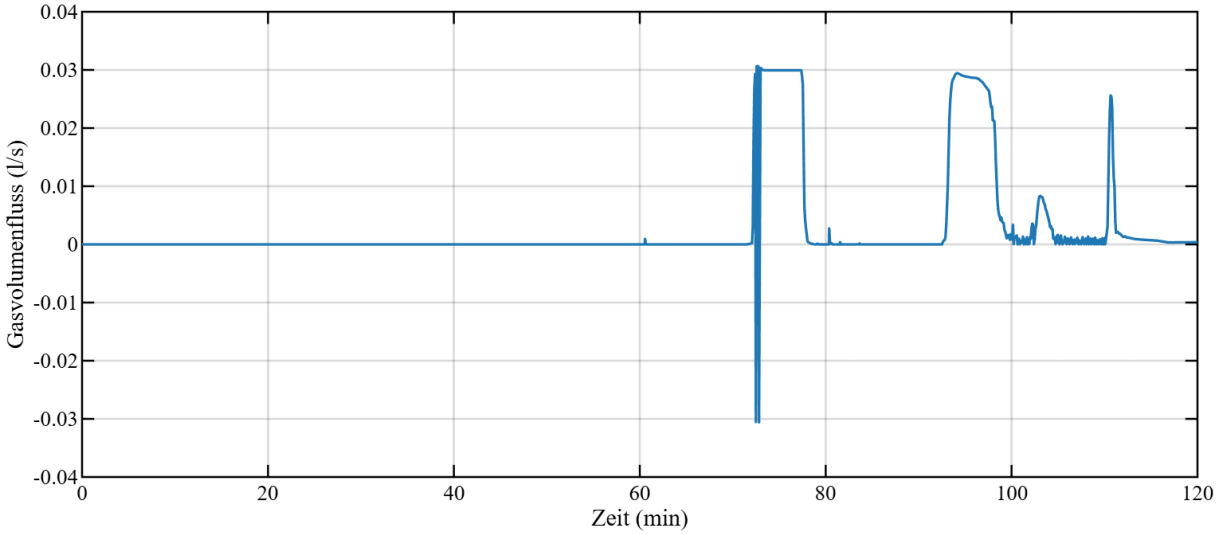
(c) Messung 1: Temperatursensor Ausgang Moderatorbehälter



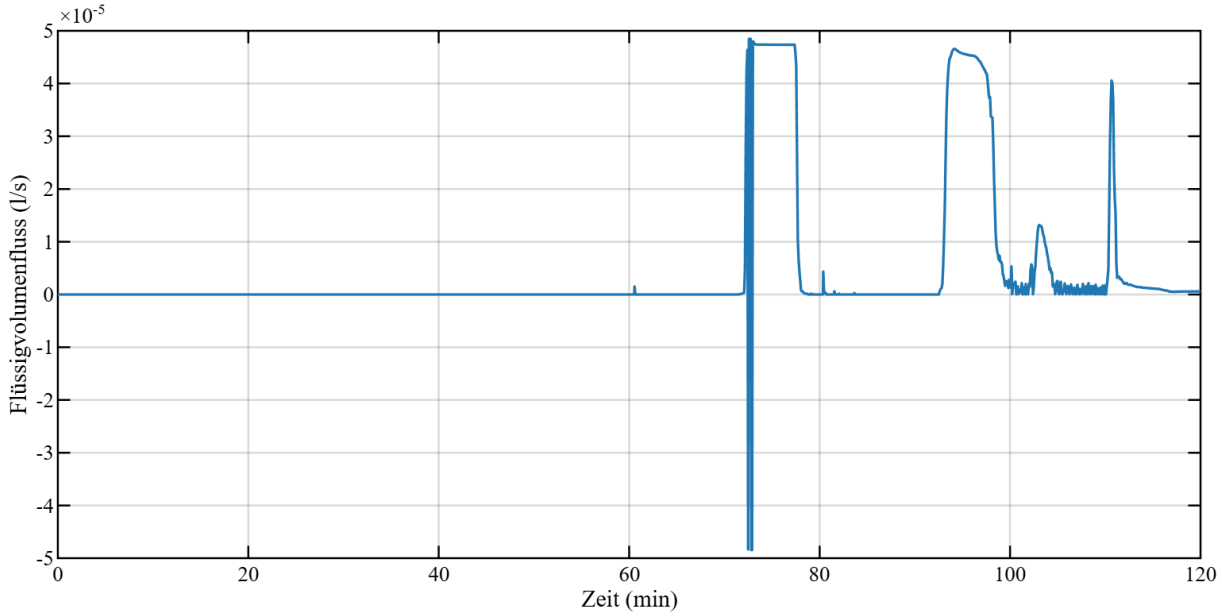
(a) Messung 1: Heizleitungs am Ausgang Moderatorbehälter



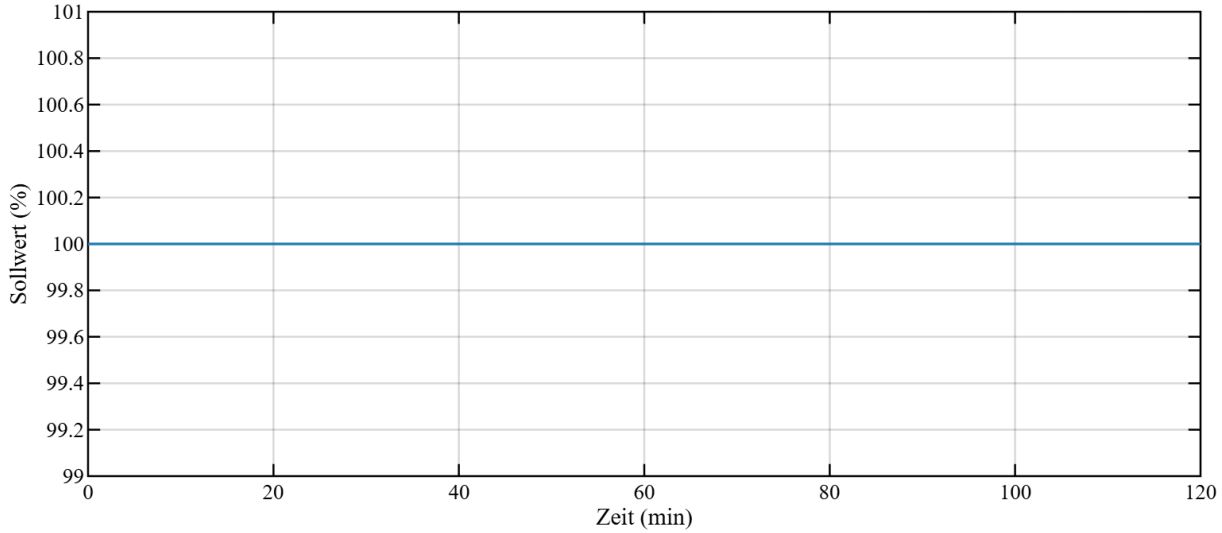
(b) Messung 1: Methan MFC – Massefluss



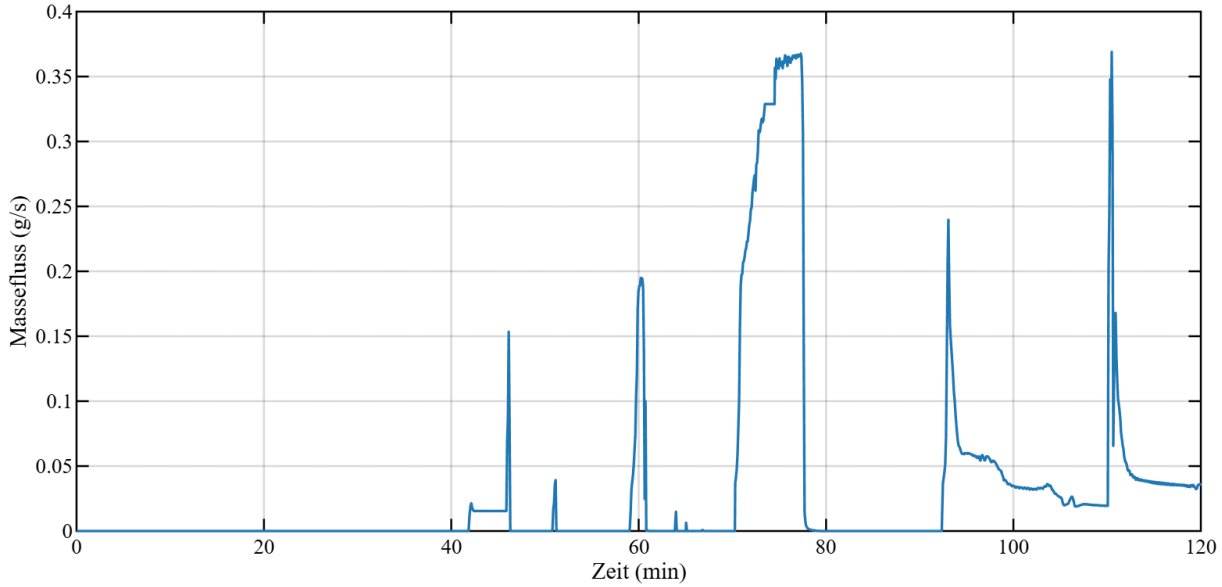
(c) Messung 1: Methan MFC – Gasvolumenfluss



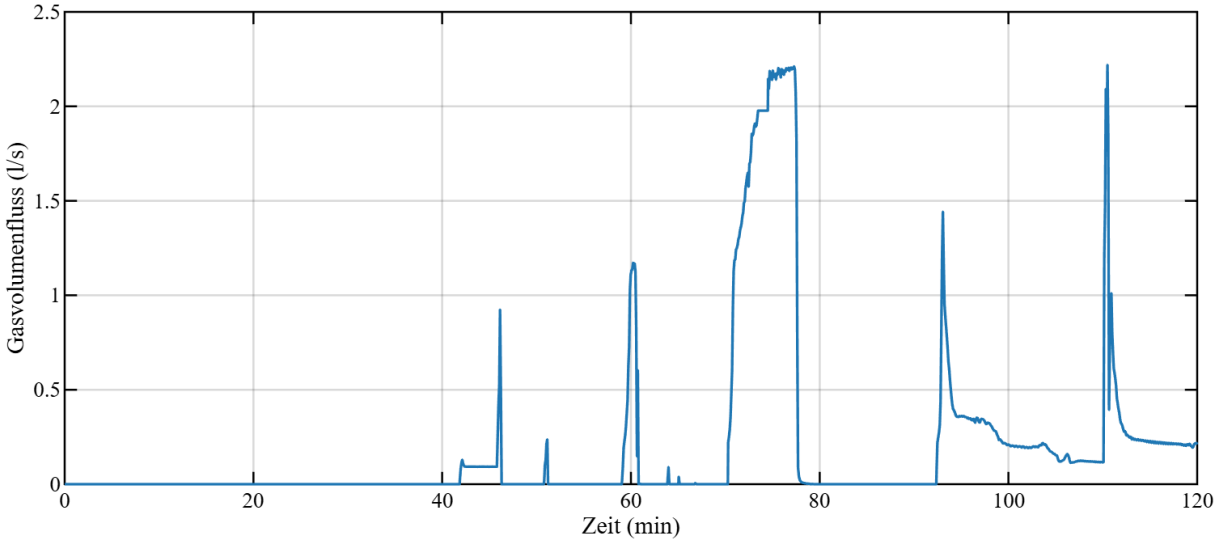
(a) Messung 1: Methan MFC – Flüssigvolumenfluss



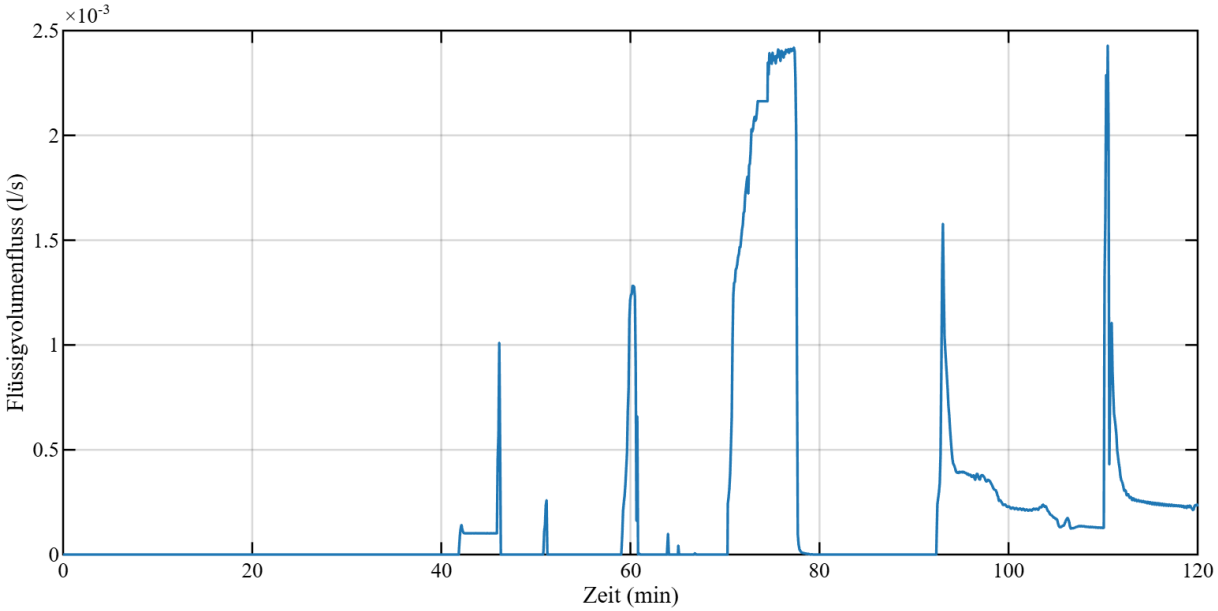
(b) Messung 1: Methan MFC – Sollwert



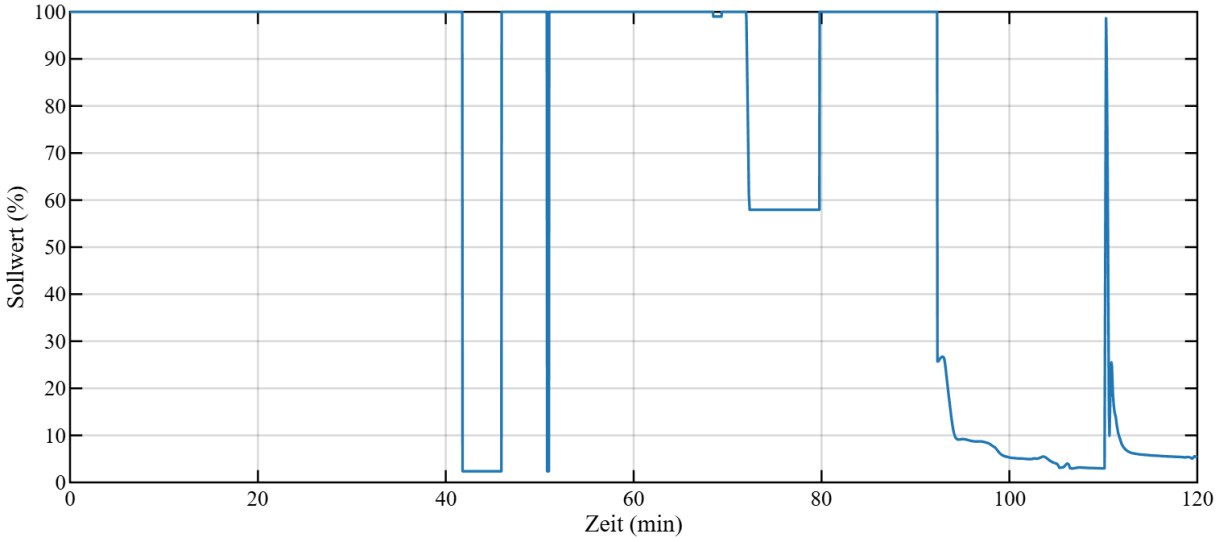
(c) Messung 1: Helium MFC – Massefluss



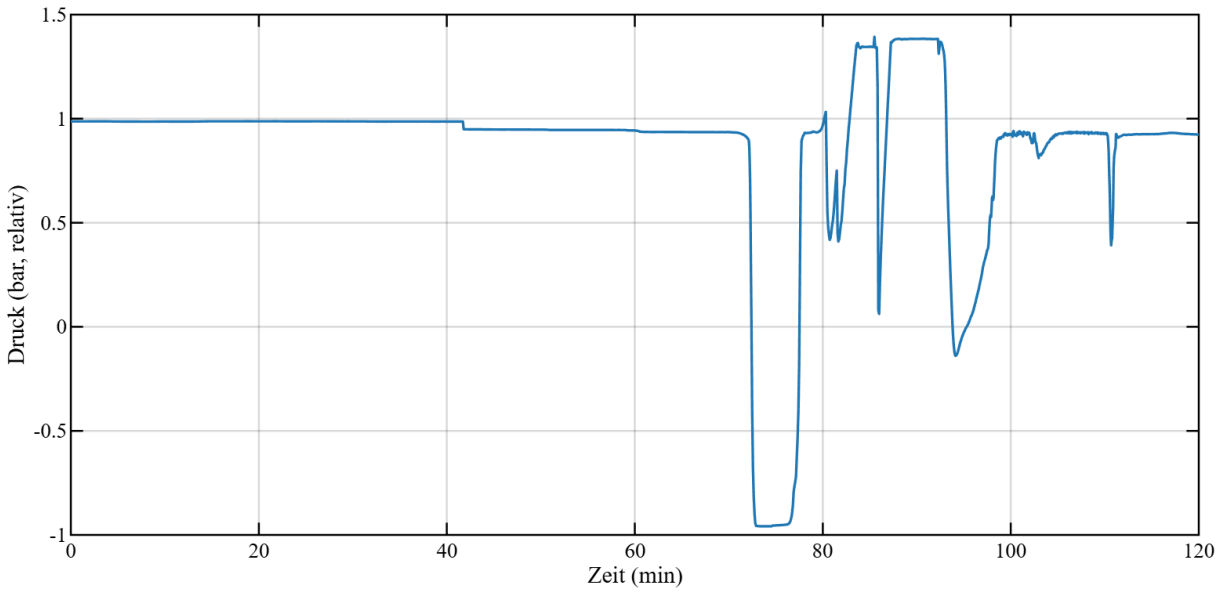
(a) Messung 1: Helium MFC – Gasvolumenfluss



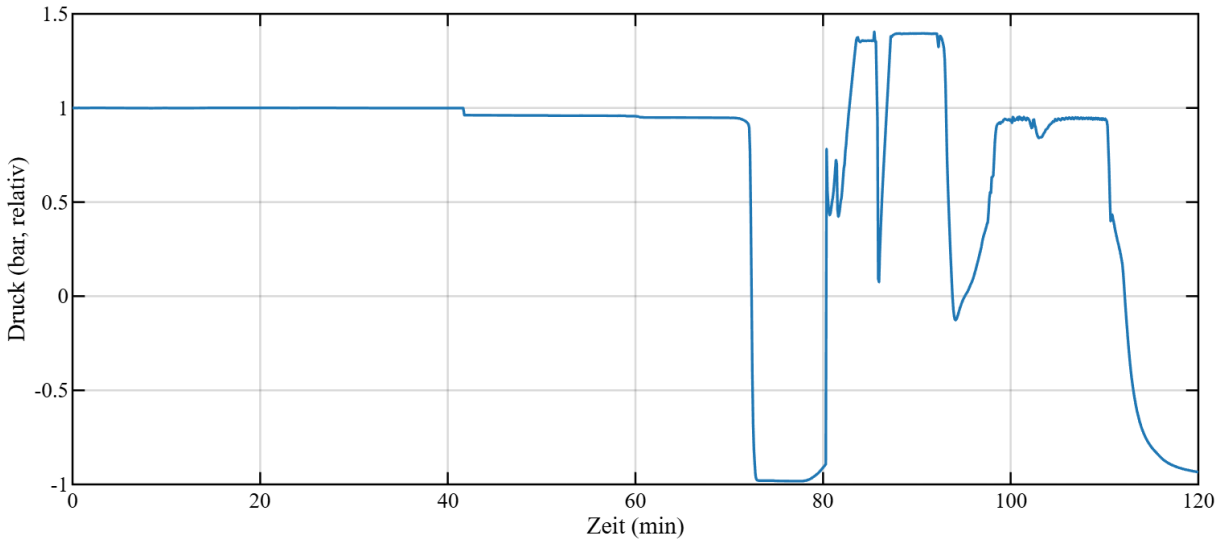
(b) Messung 1: Helium MFC – Flüssigvolumenfluss



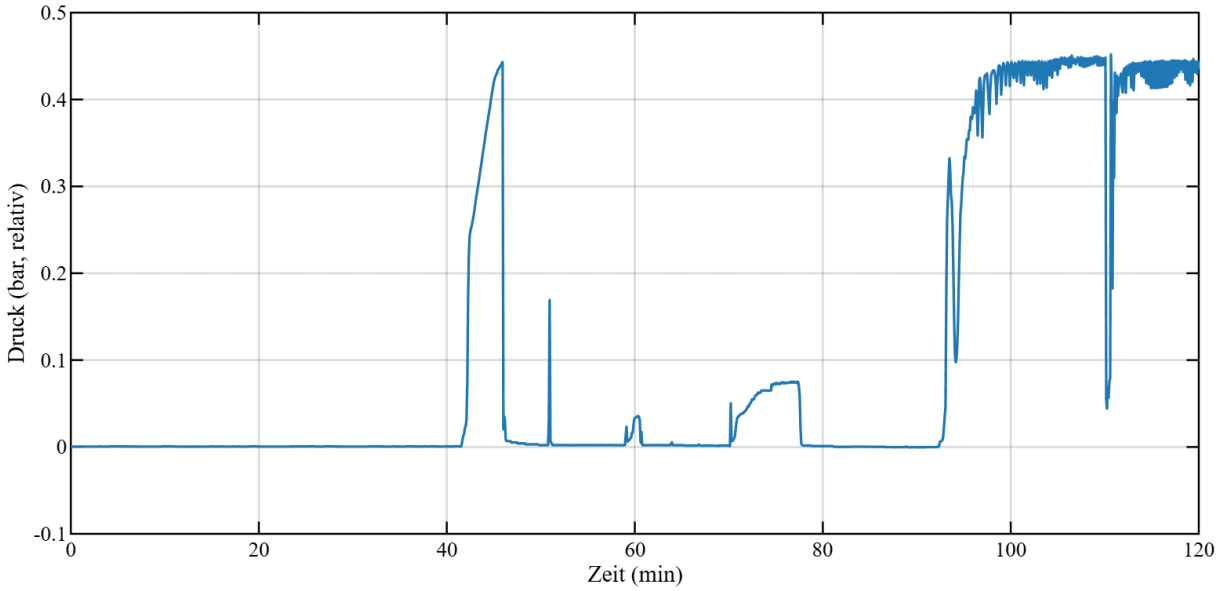
(c) Messung 1: Helium MFC – Sollwert



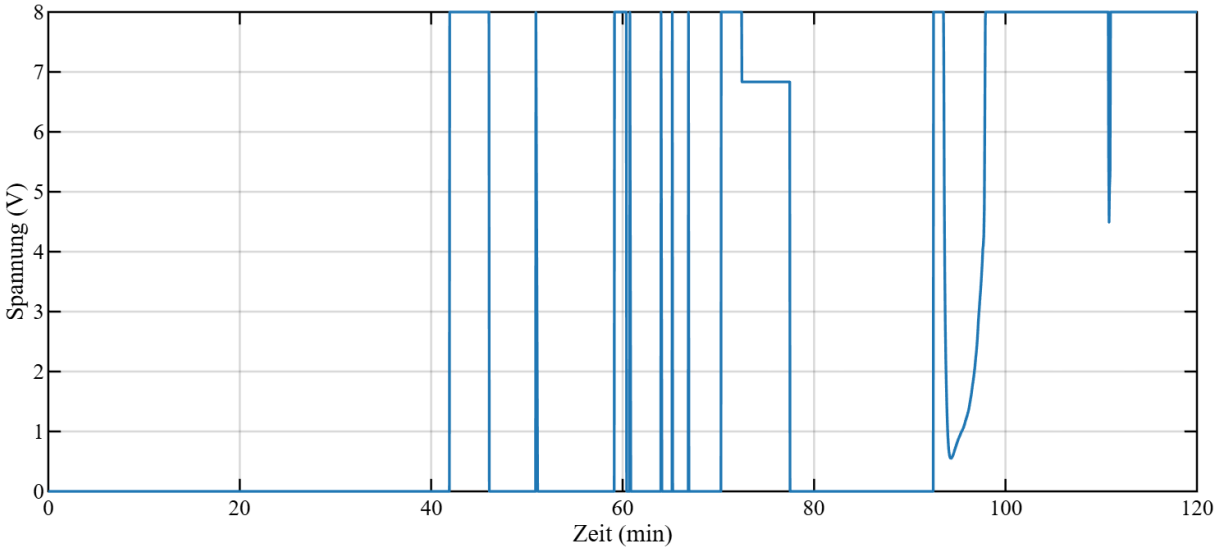
(a) Messung 1: Drucksensor 1 (Moderatorgas Eingang)



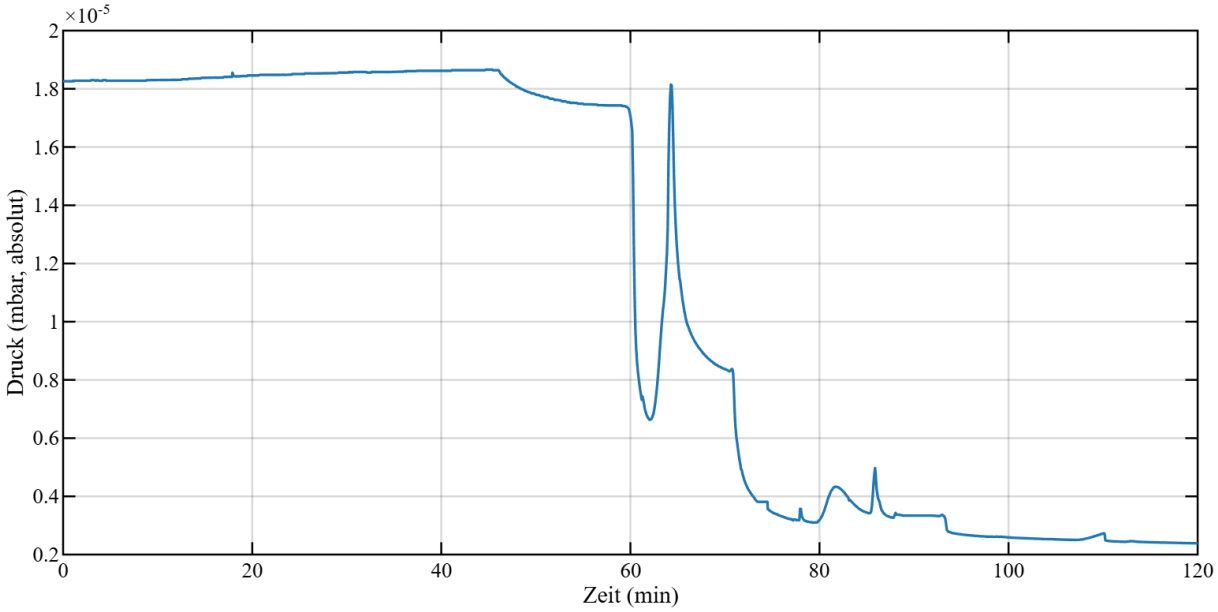
(b) Messung 1: Drucksensor 2 (Moderatorgas Ausgang)



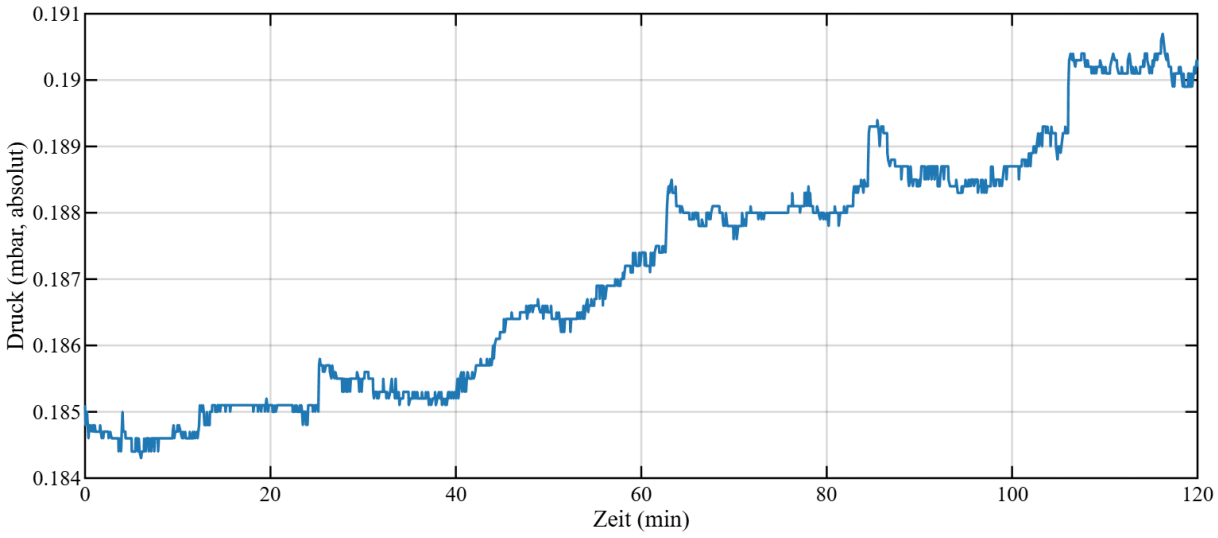
(c) Messung 1: Drucksensor 3 (Kühlgas Ausgang)



(a) Messung 1: Spannungsgeber für den Transferheber

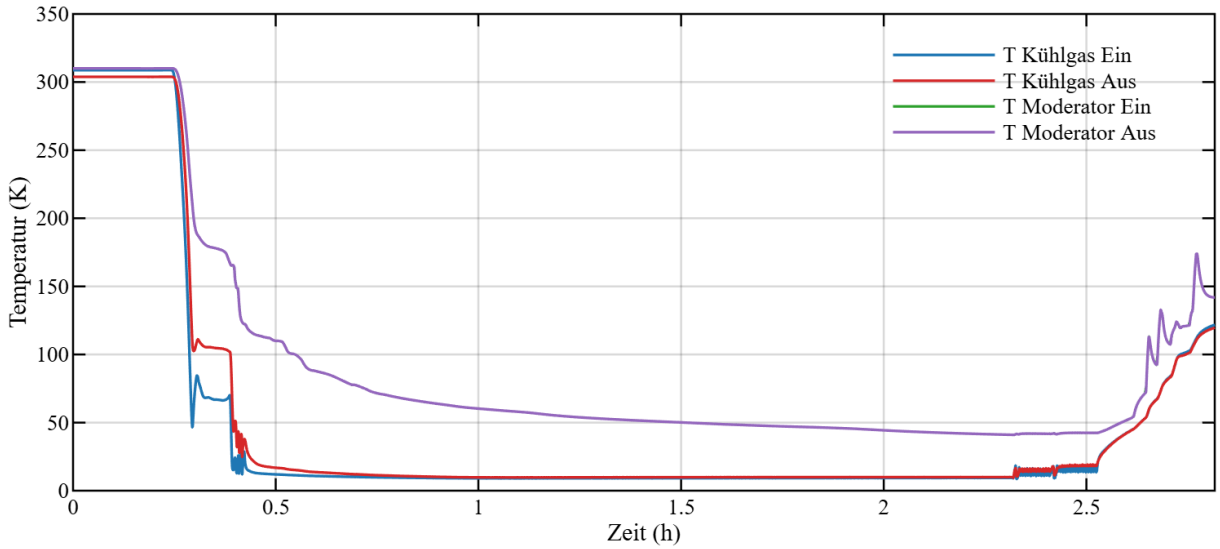


(b) Messung 1: Vakuummessröhre MPT200

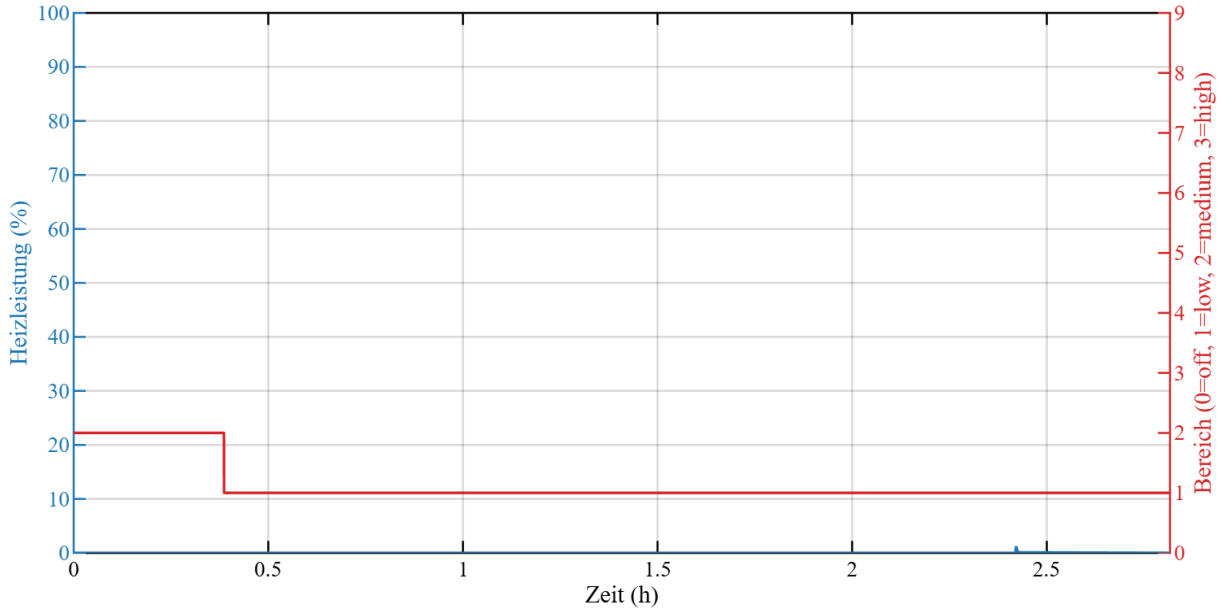


(c) Messung 1: Vakuummessröhre PPT200

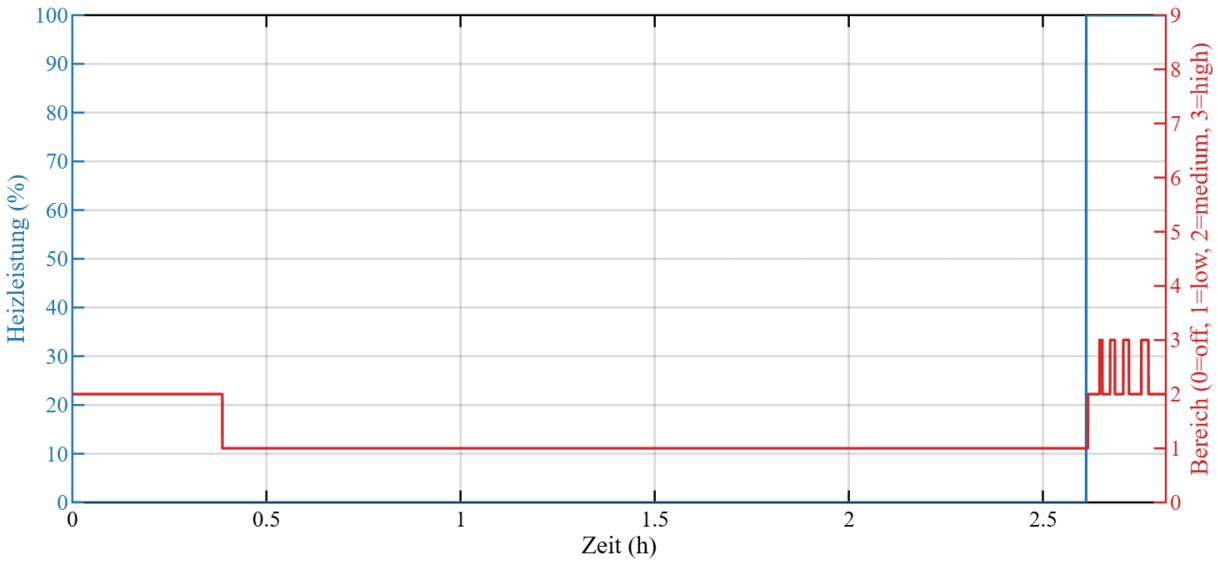
A.2 Messung 1: Methan (mit Helium gekühlt)



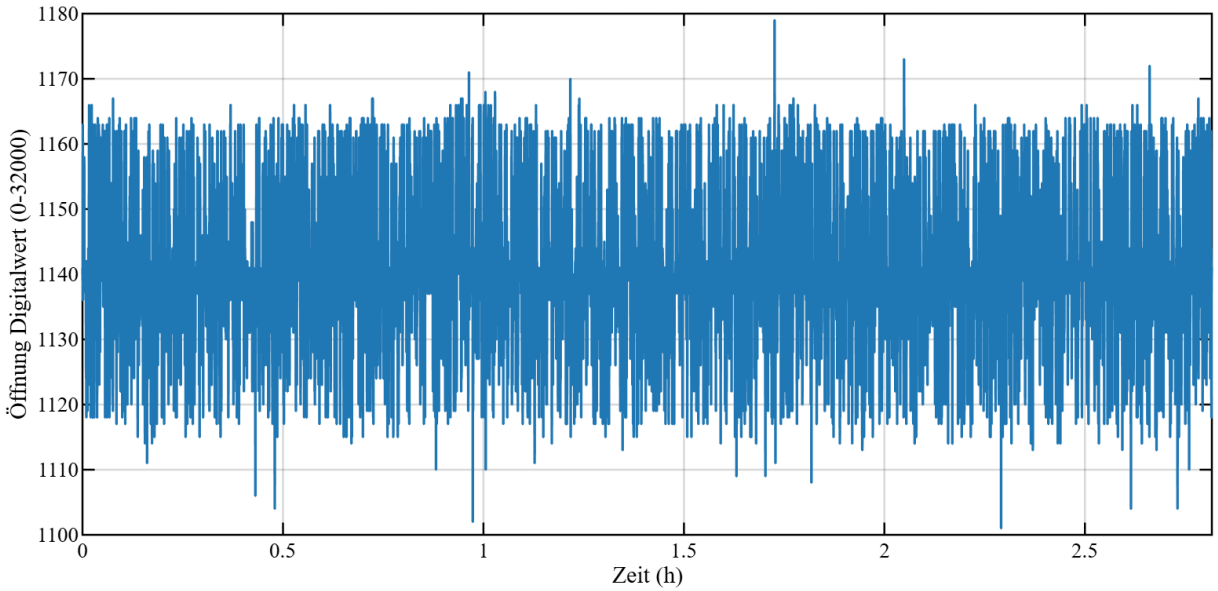
(a) Messung 20.04.26: Temperatursensoren (Grün und lila überlappen im ganzen Bereich)



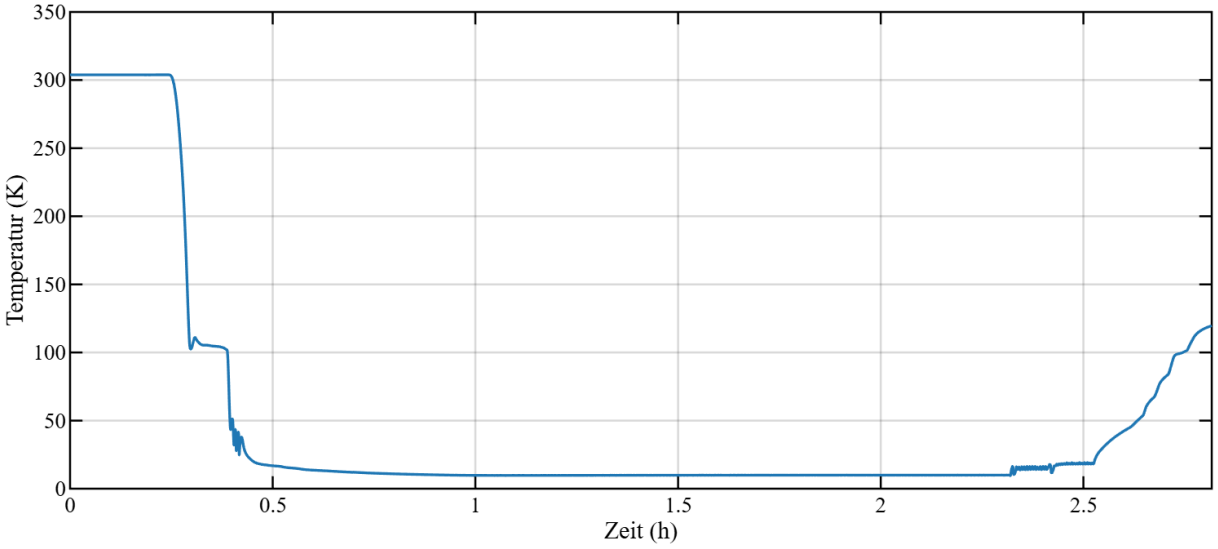
(b) Messung 20.04.26: Heizleistung und Bereich — Kühlgas Eingang



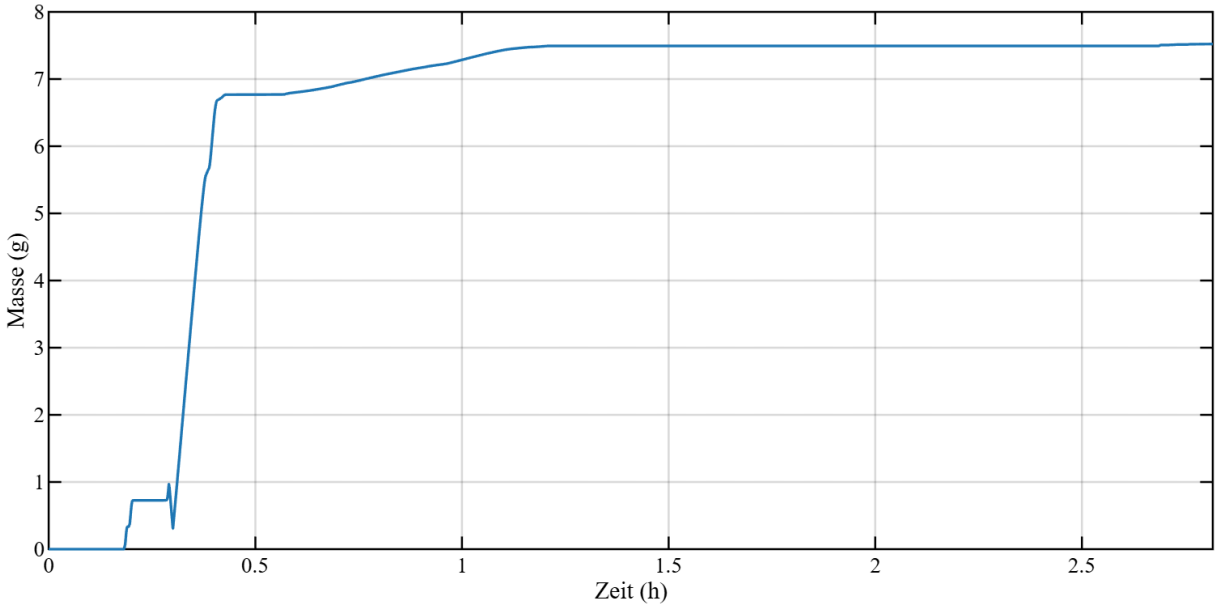
(a) Messung 20.04.26: Heizleistung und Bereich — Moderator Ausgang



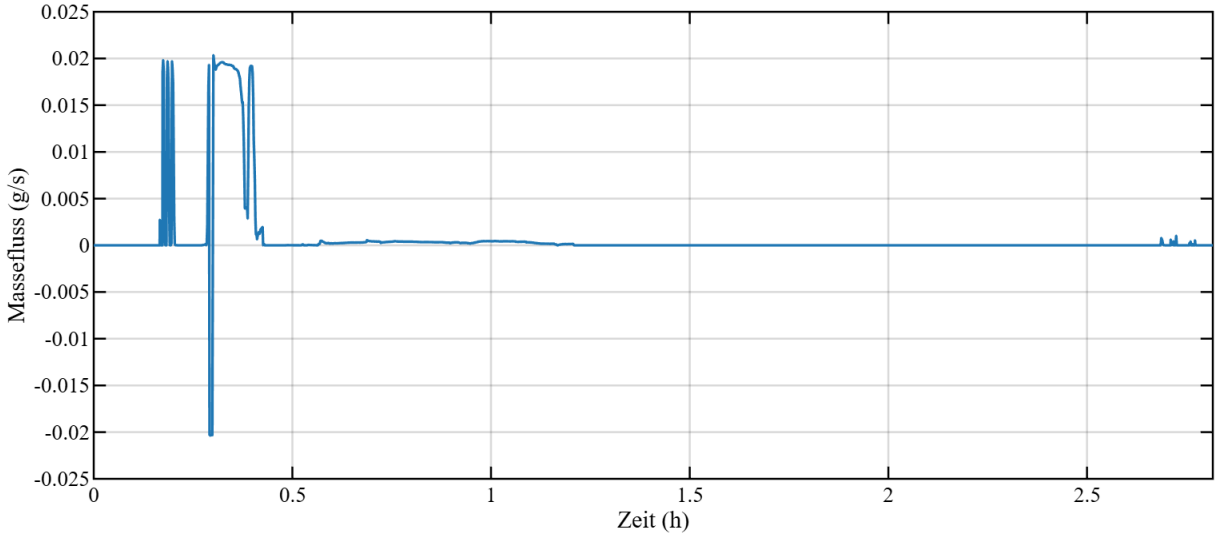
(b) Messung 20.04.26: Buerkert Druckregler



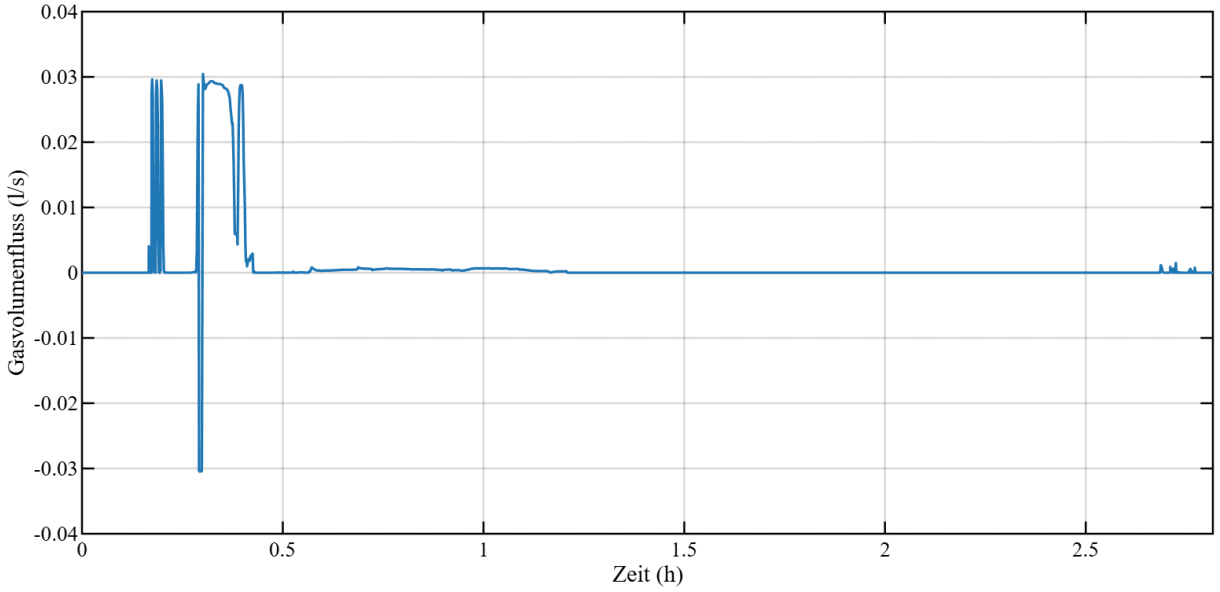
(c) Messung 20.04.26: Kryostat Temperatur - Regelgröße (Kühlgas Ausgang)



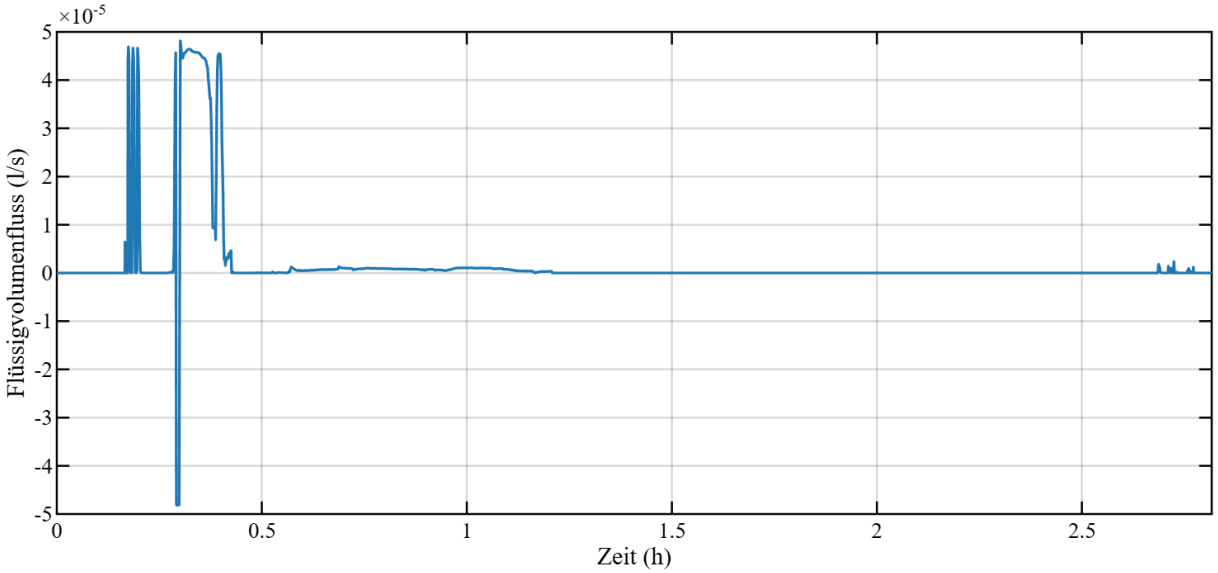
(a) Messung 20.04.26: Methan MFC — Masseintegral



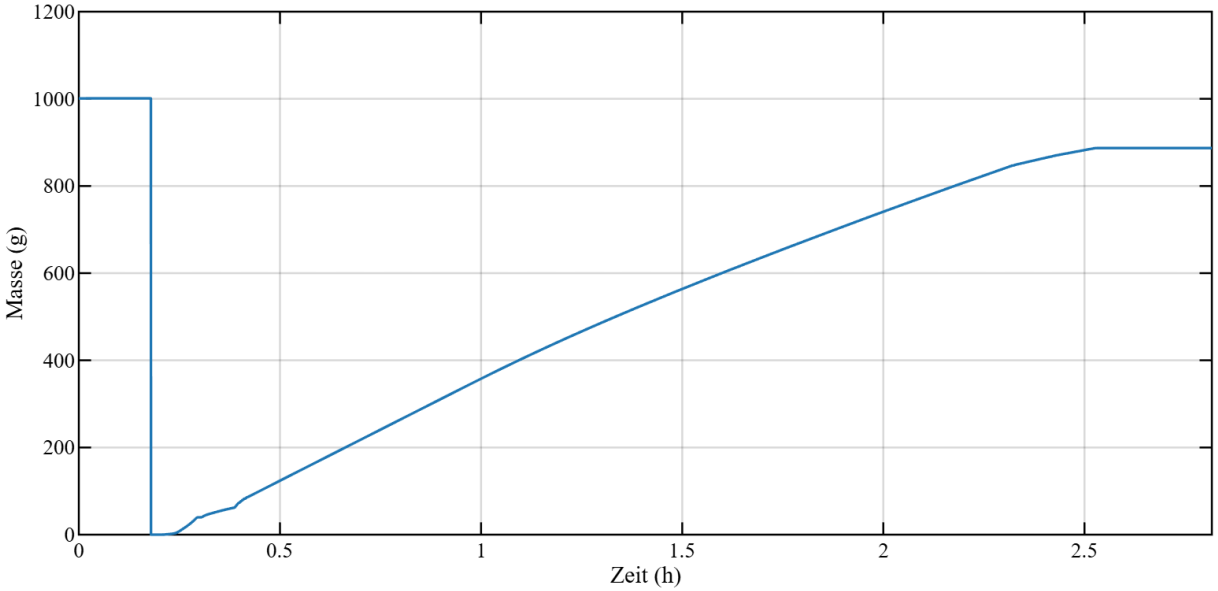
(b) Messung 20.04.26: Methan MFC — Massefluss



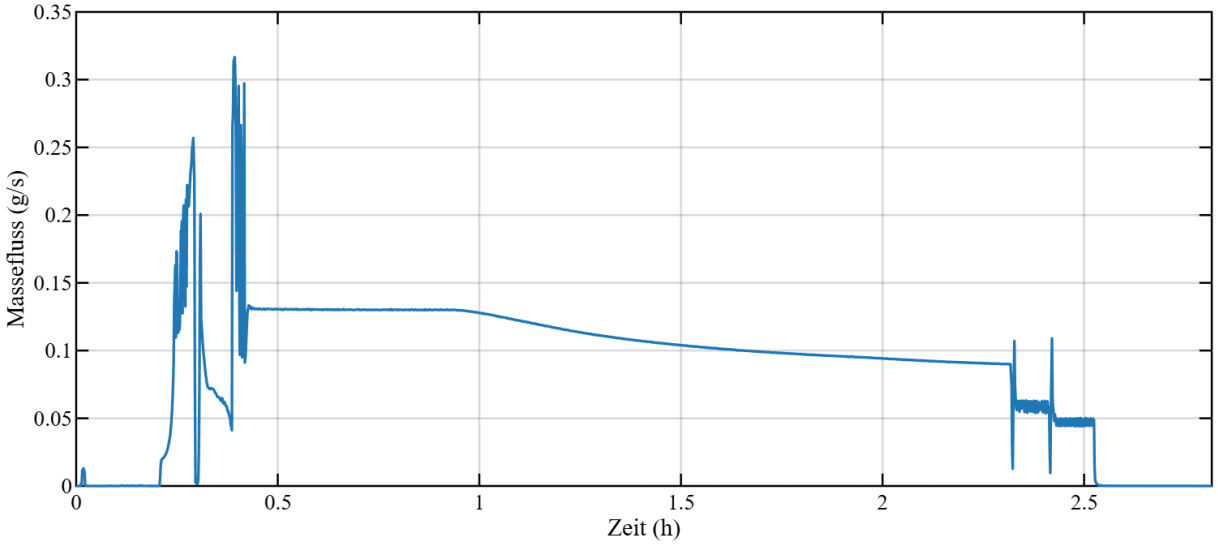
(c) Messung 20.04.26: Methan MFC — Gasvolumenfluss



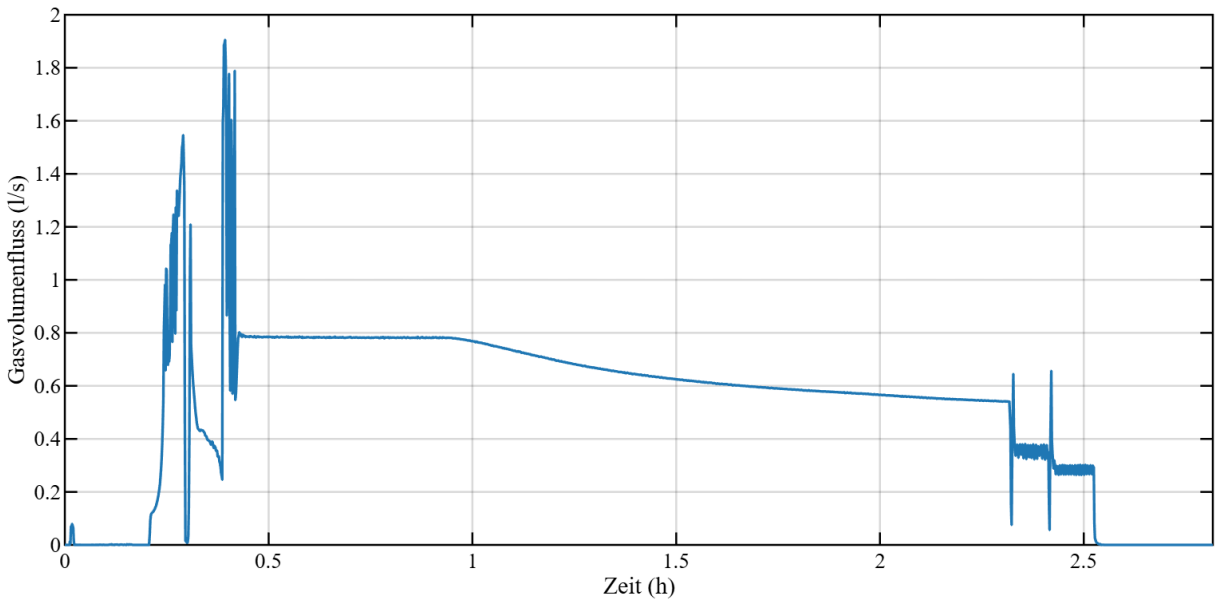
(a) Messung 20.04.26: Methan MFC — Flüssigvolumenfluss



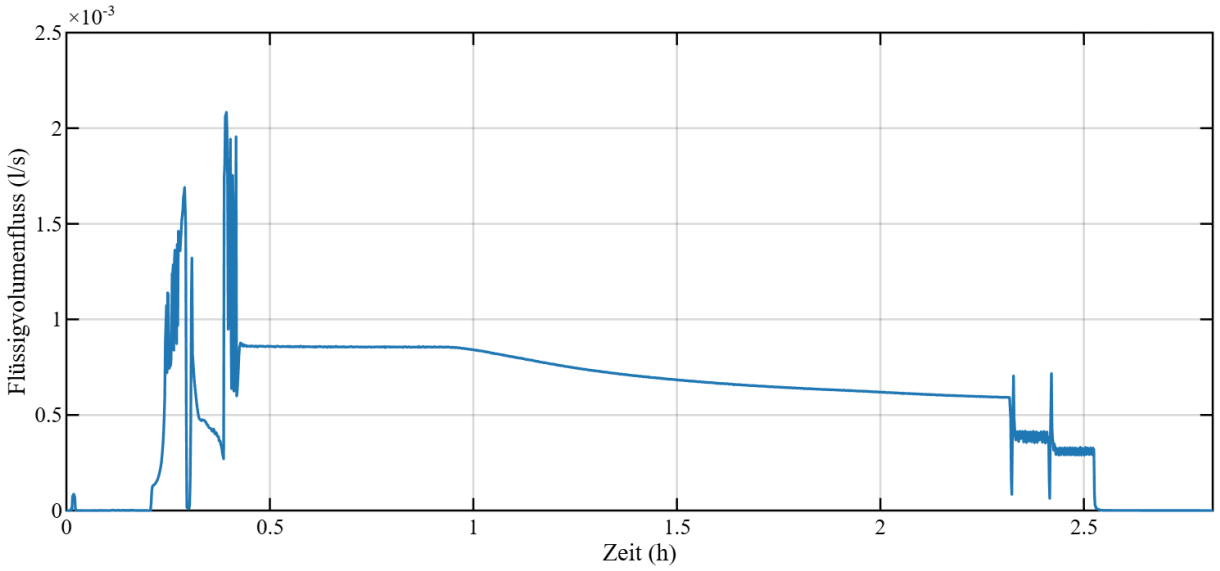
(b) Messung 20.04.26: Helium MFC — Masseintegral



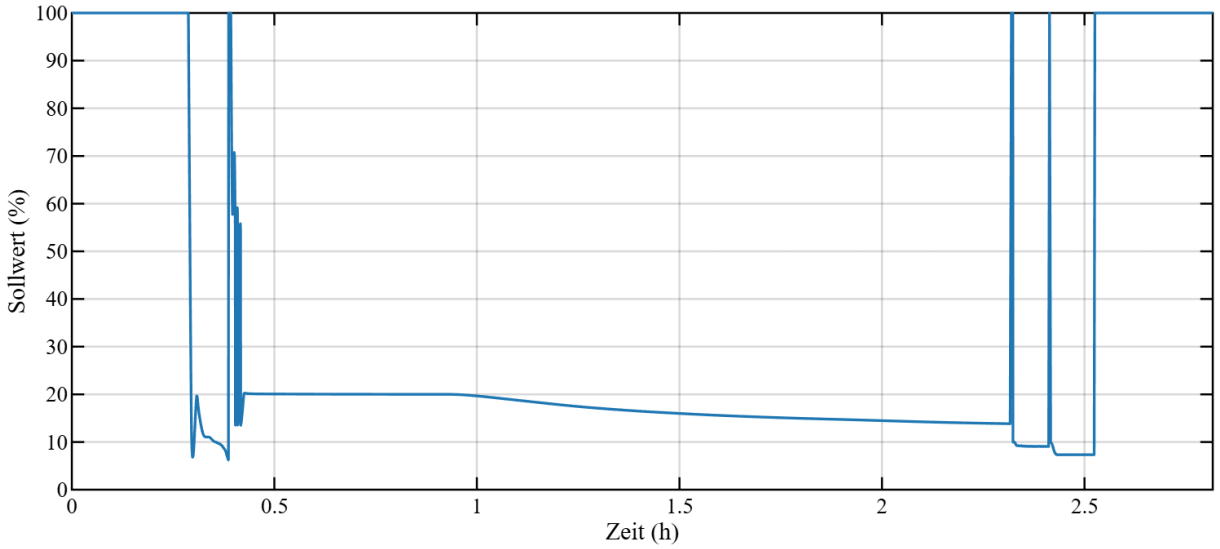
(c) Messung 20.04.26: Helium MFC — Massefluss



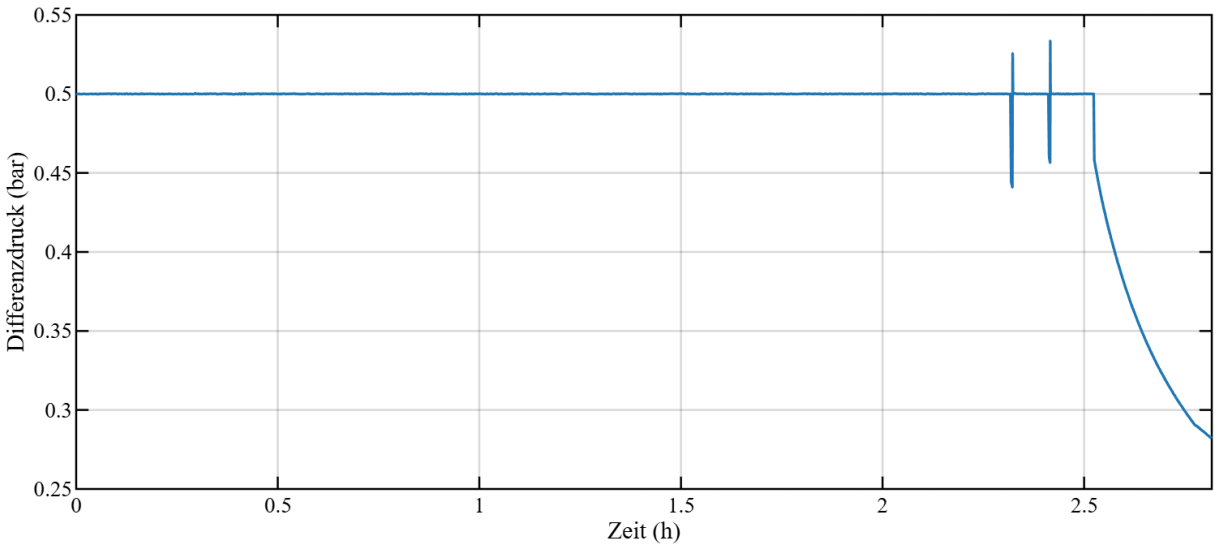
(a) Messung 20.04.26: Helium MFC — Gasvolumenfluss



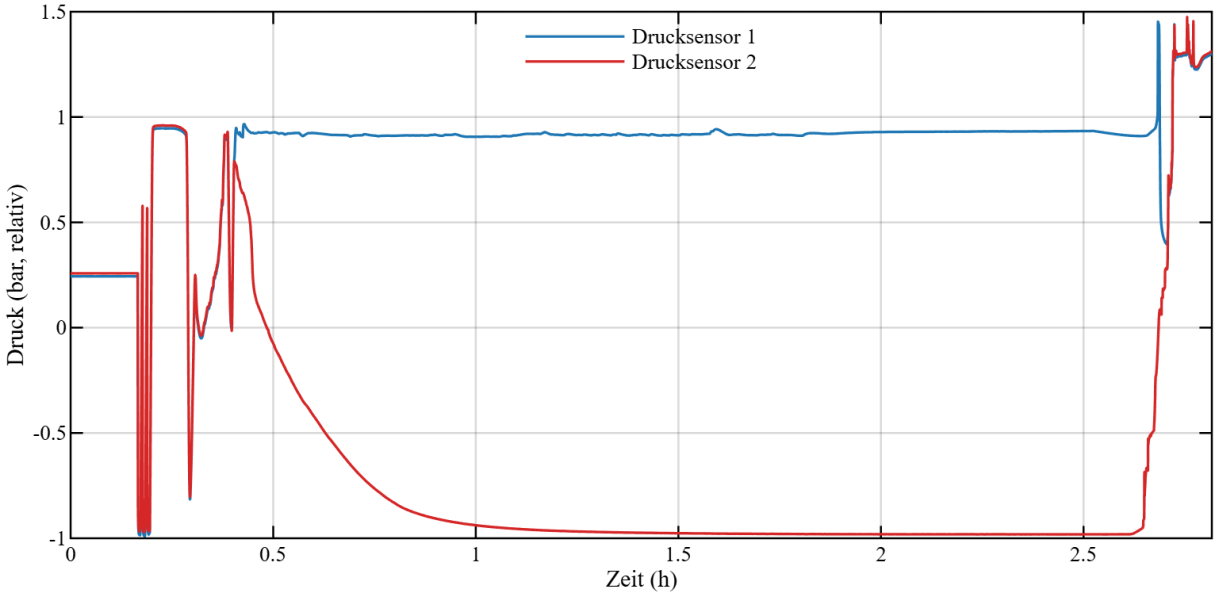
(b) Messung 20.04.26: Helium MFC — Flüssigvolumenfluss



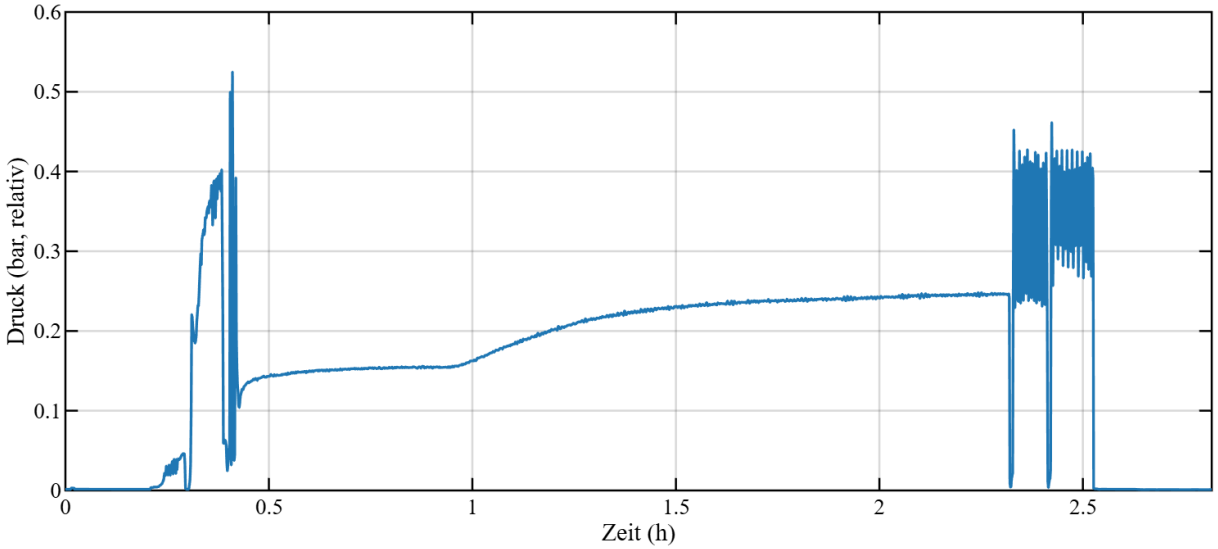
(c) Messung 20.04.26: Helium MFC — Sollwert



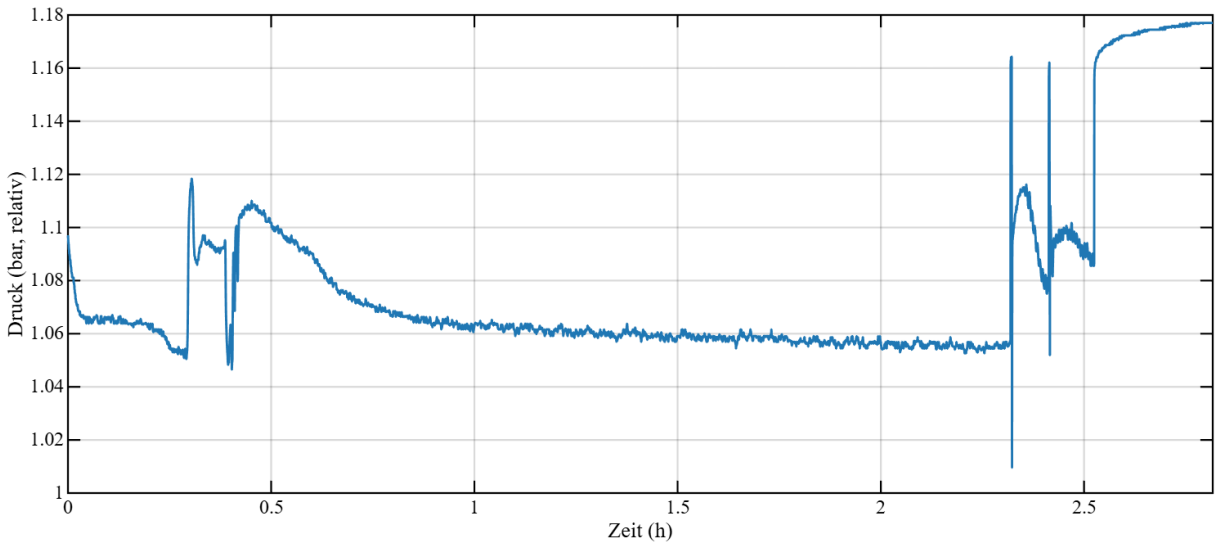
(a) Messung 20.04.26: Druckregler Helium



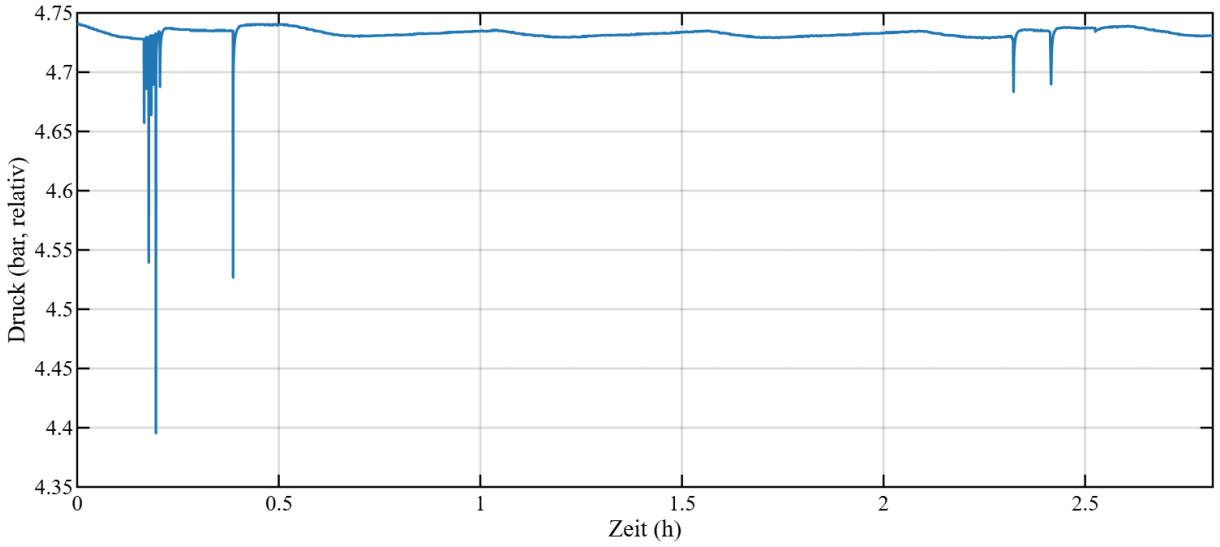
(b) Messung 20.04.26: Drucksensoren 1 und 2 (Moderatorgas Ein- und Ausgang)



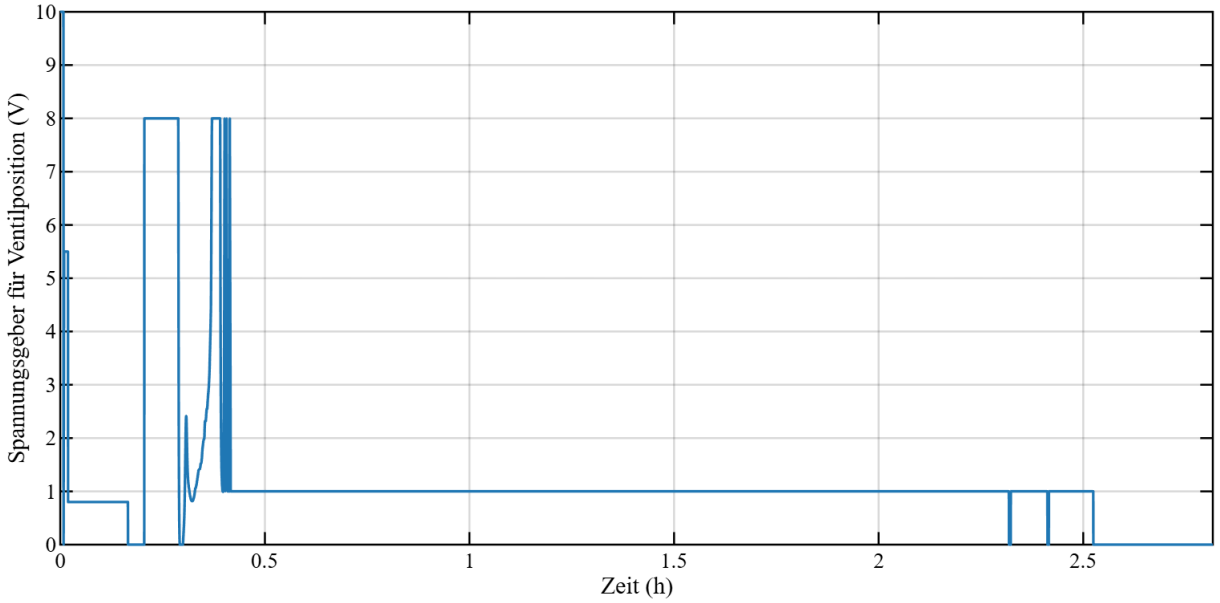
(c) Messung 20.04.26: Drucksensor 3 (Kühlgas Ausgang)



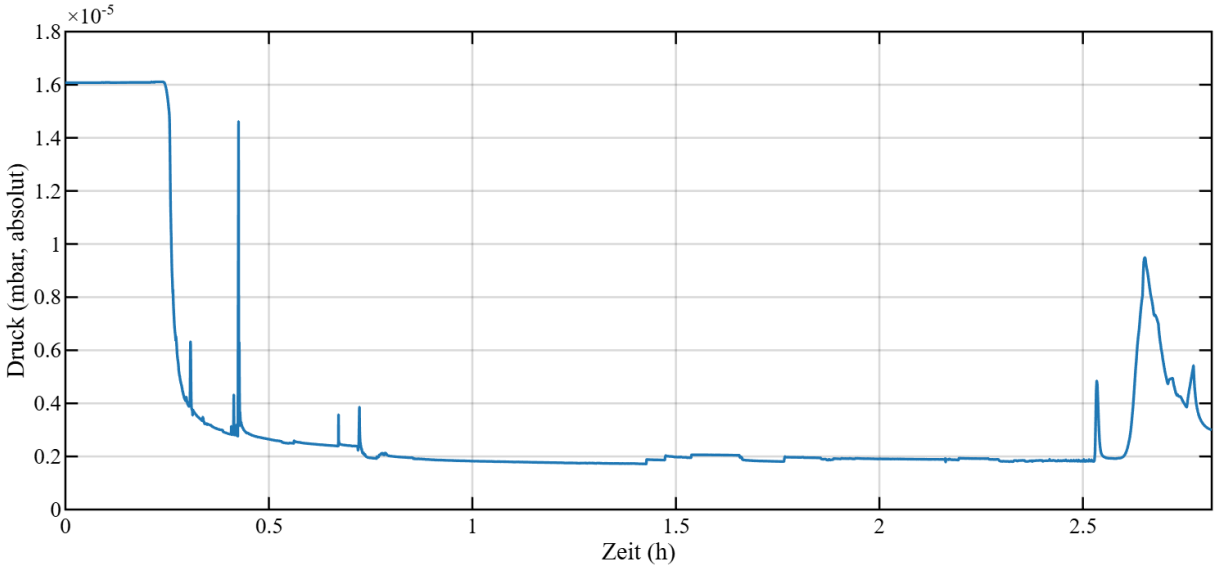
(a) Messung 20.04.26: Drucksensor 4 (Gasversorgung Kühlgas)



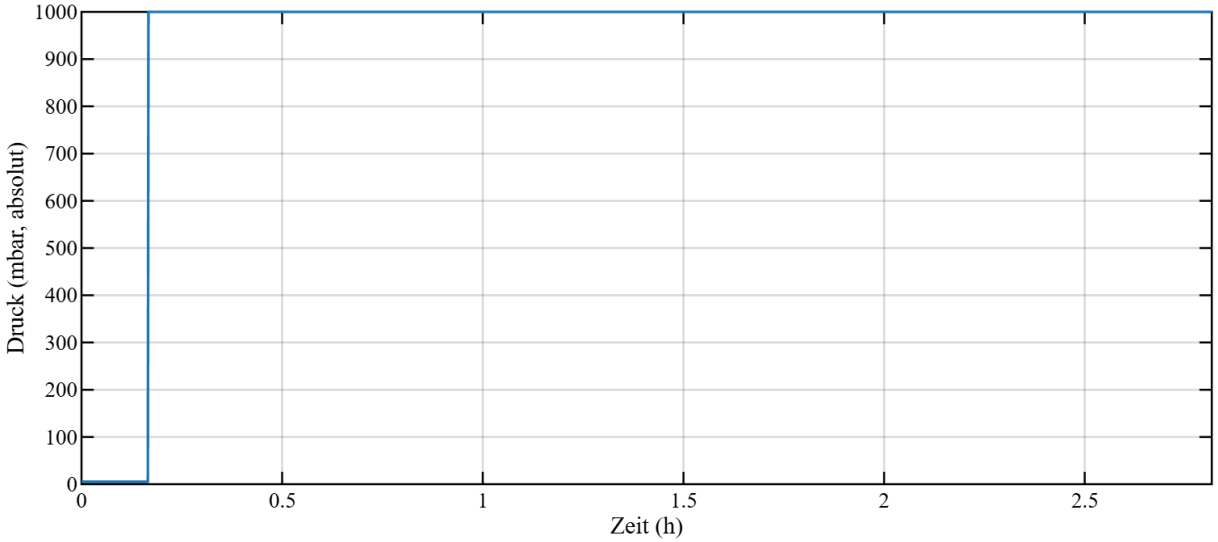
(b) Messung 20.04.26: Drucksensor Eingang (Druckluftversorgung)



(c) Messung 20.04.26: Spannungsgeber für den Transferheber

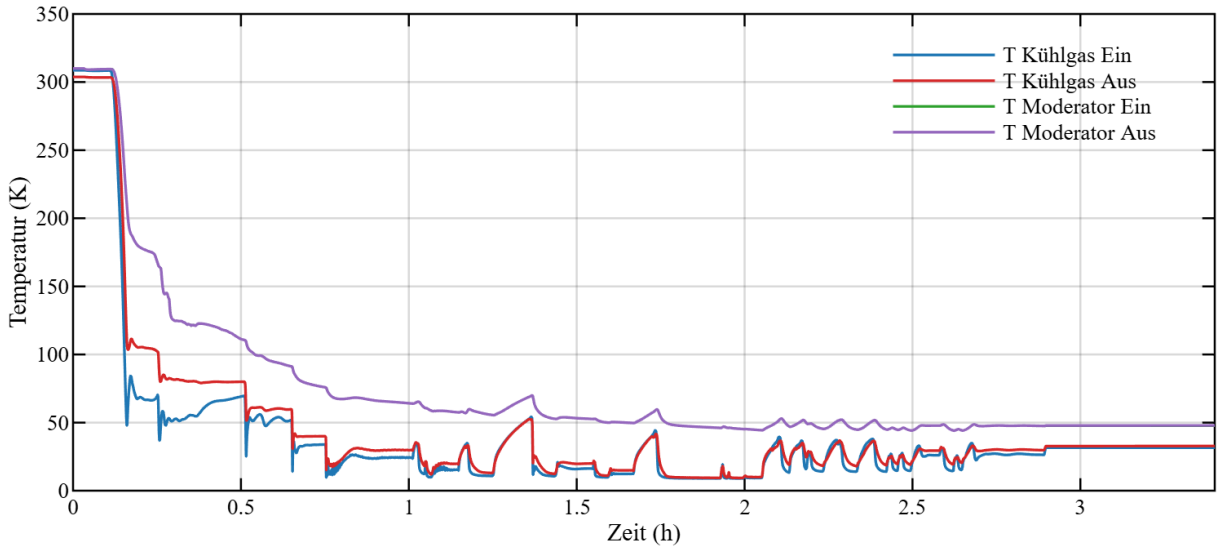


(a) Messung 20.04.26: Vakuummessröhre MPT200

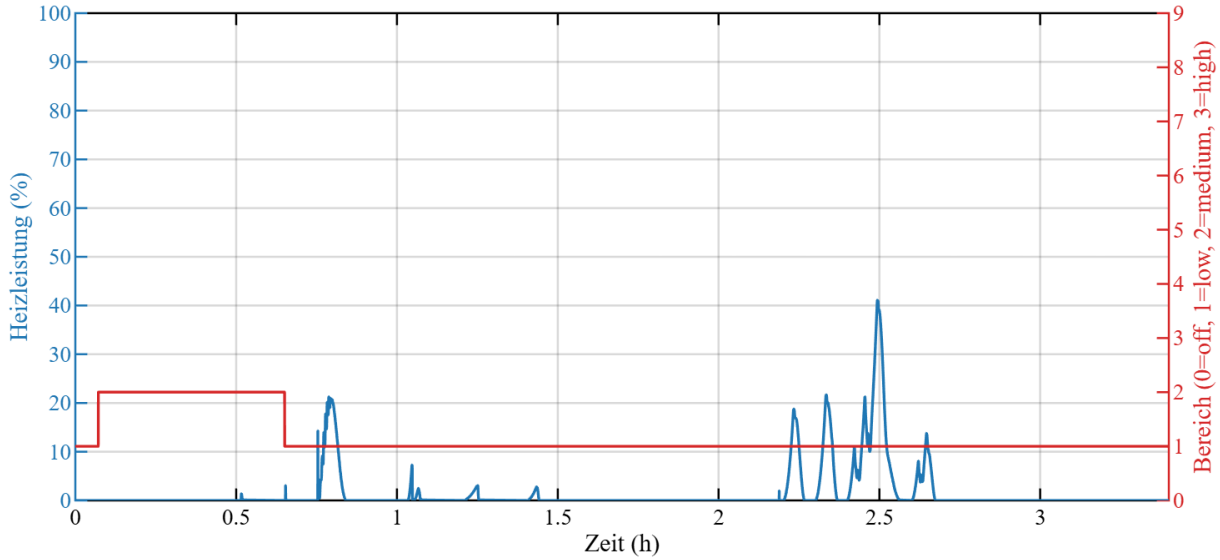


(b) Messung 20.04.26: Vakuummessröhre PPT200

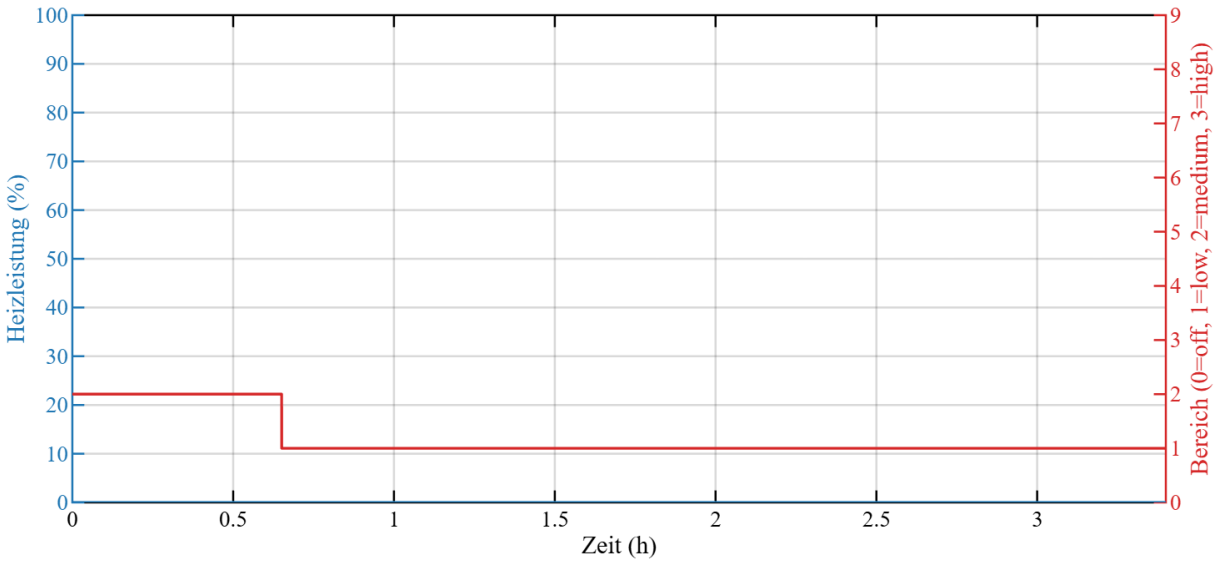
A.3 Messung 2: Methan (mit Helium gekühlt)



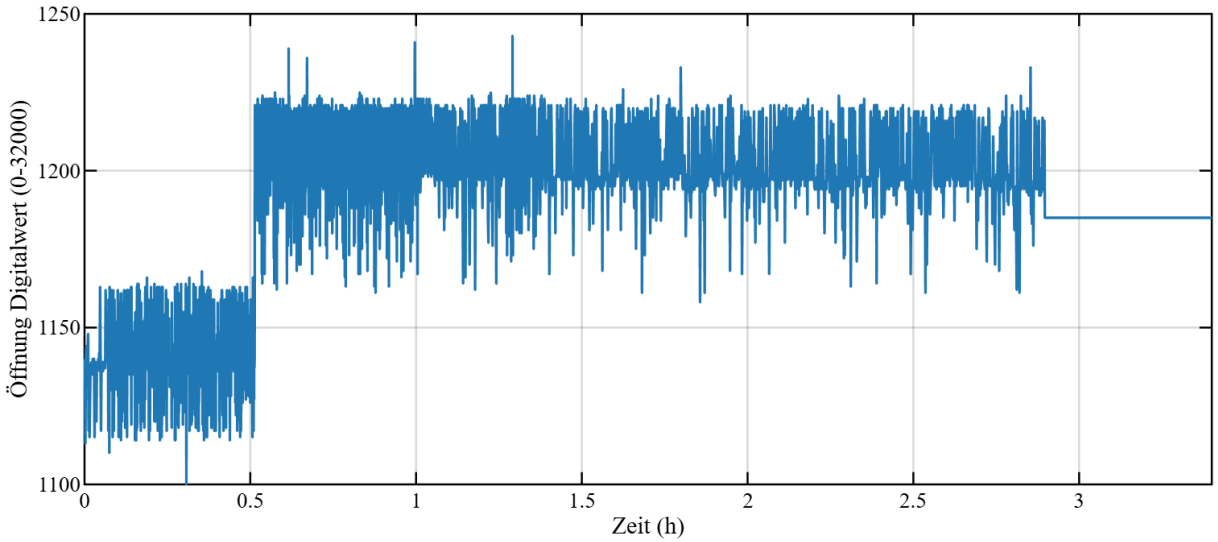
(a) Messung 22.04.26: Temperatursensoren (Grün und lila überlappen im ganzen Bereich)



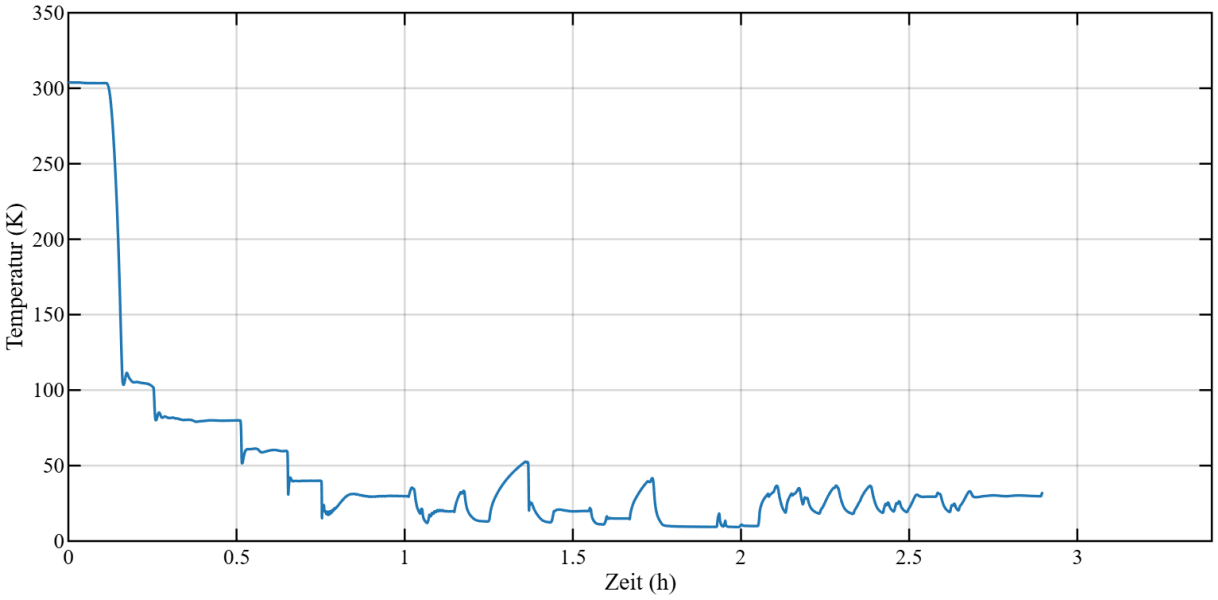
(b) Messung 22.04.26: Heizleistung und Bereich — Kühlgas Eingang



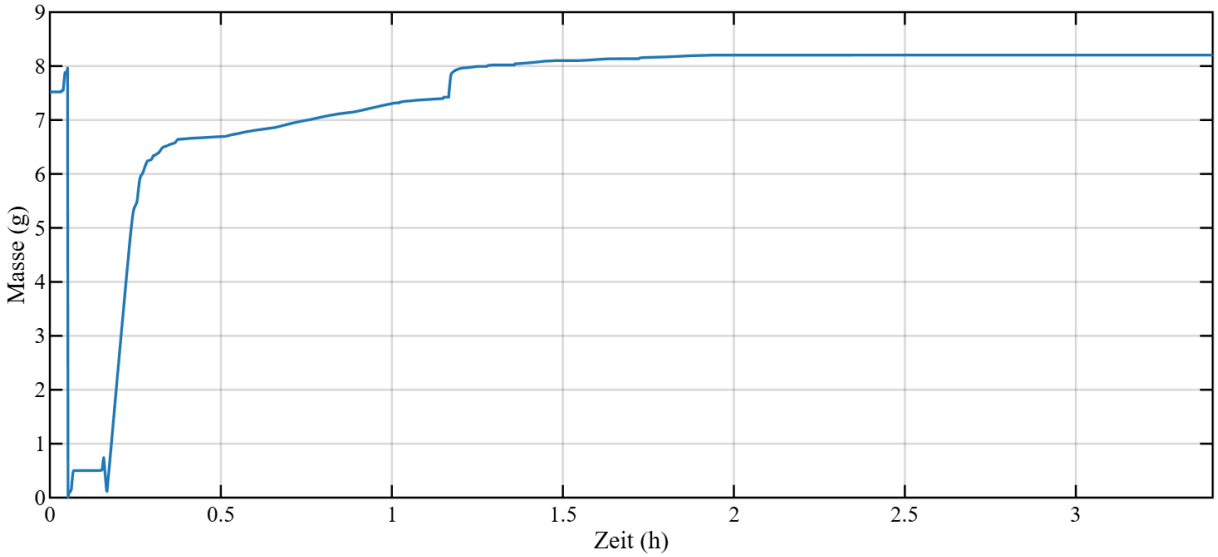
(a) Messung 22.04.26: Heizleistung und Bereich — Moderator Ausgang



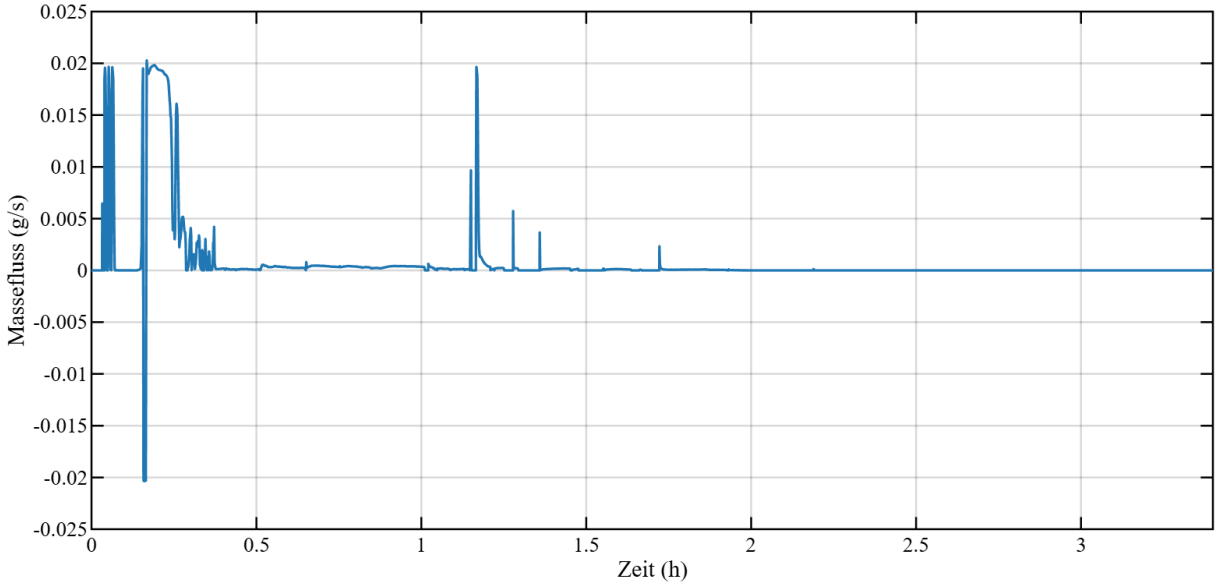
(b) Messung 22.04.26: Buerkert Druckregler



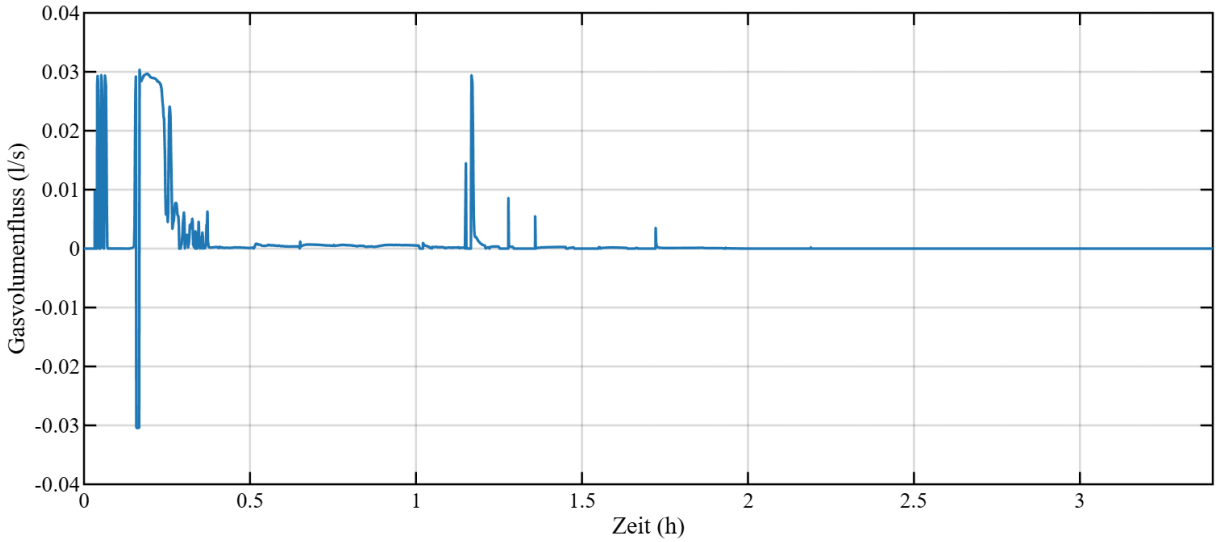
(c) Messung 22.04.26: Kryostat Temperatur - Regelgröße (Kühlgas Ausgang)



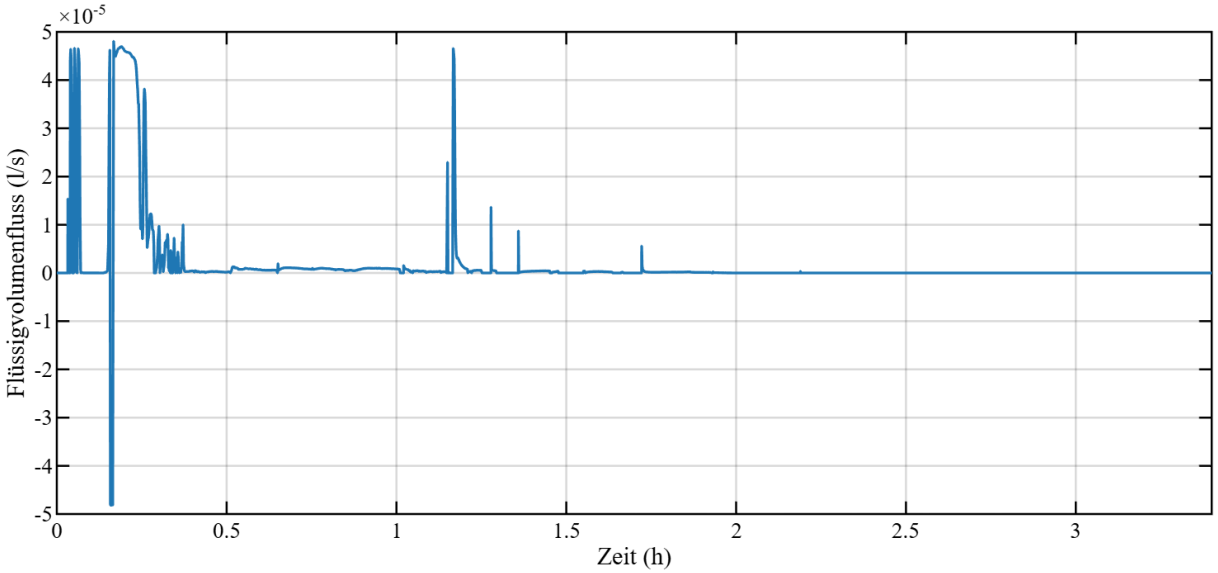
(a) Messung 22.04.26: Methan MFC — Masseintegral



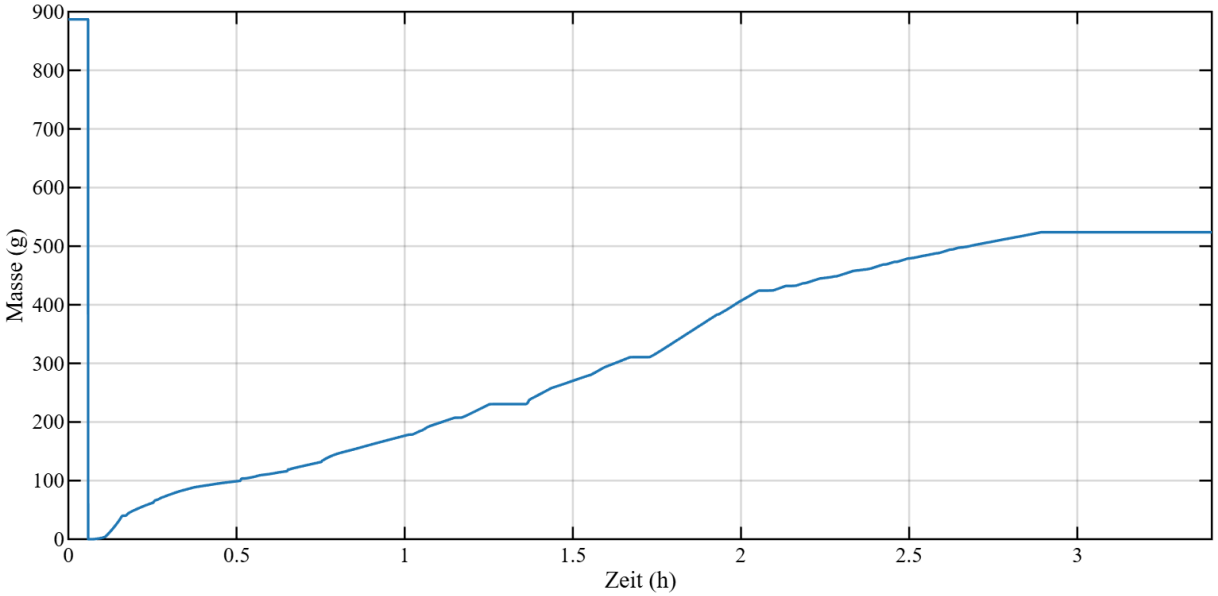
(b) Messung 22.04.26: Methan MFC — Massefluss



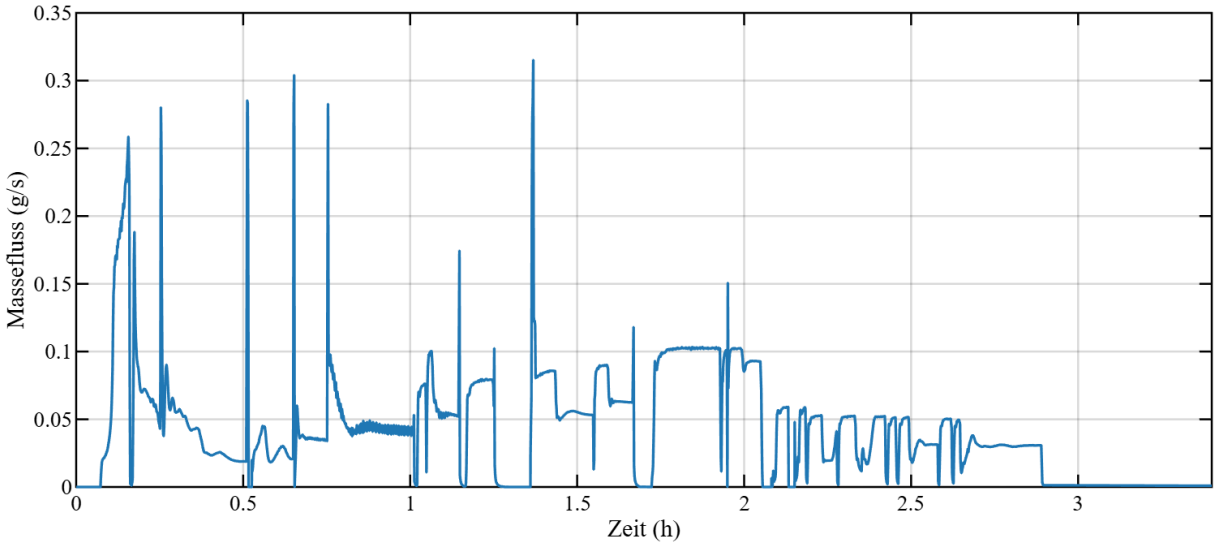
(c) Messung 22.04.26: Methan MFC — Gasvolumenfluss



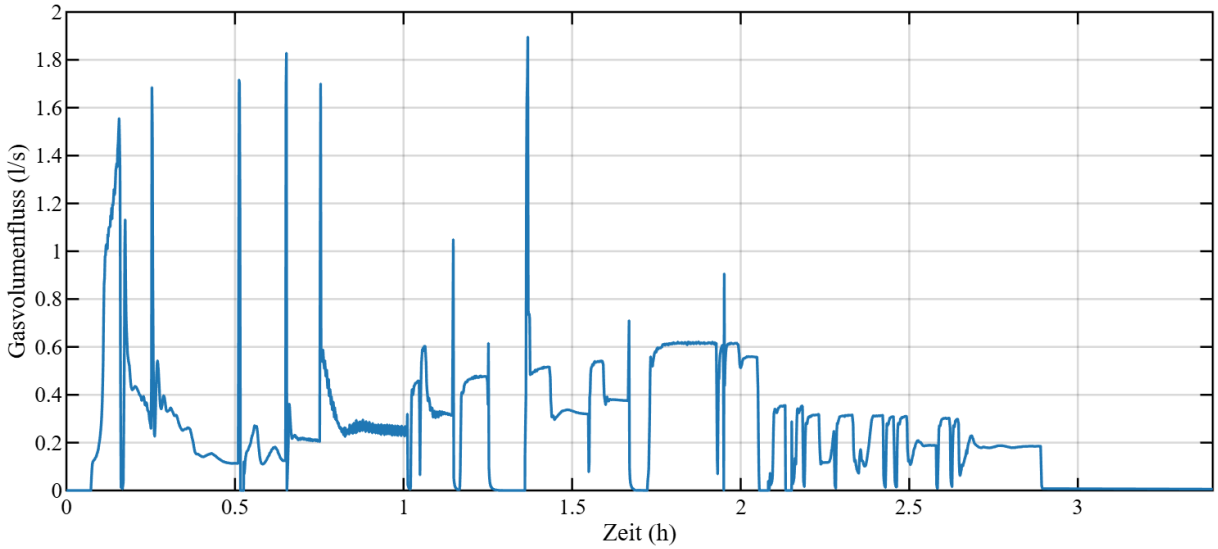
(a) Messung 22.04.26: Methan MFC — Flüssigvolumenfluss



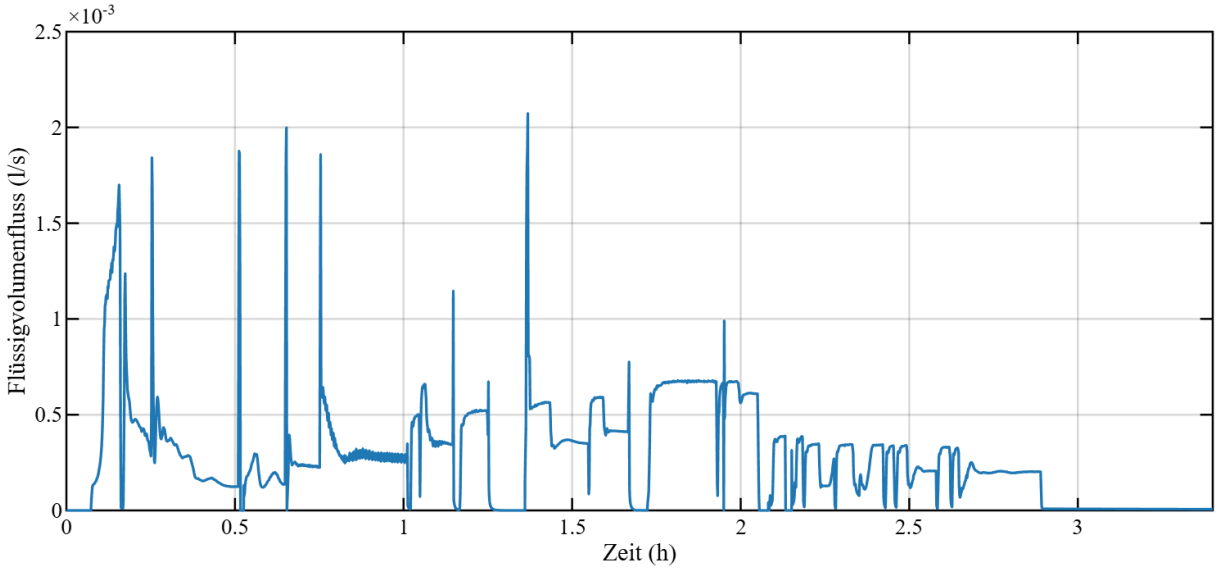
(b) Messung 22.04.26: Helium MFC — Masseintegral



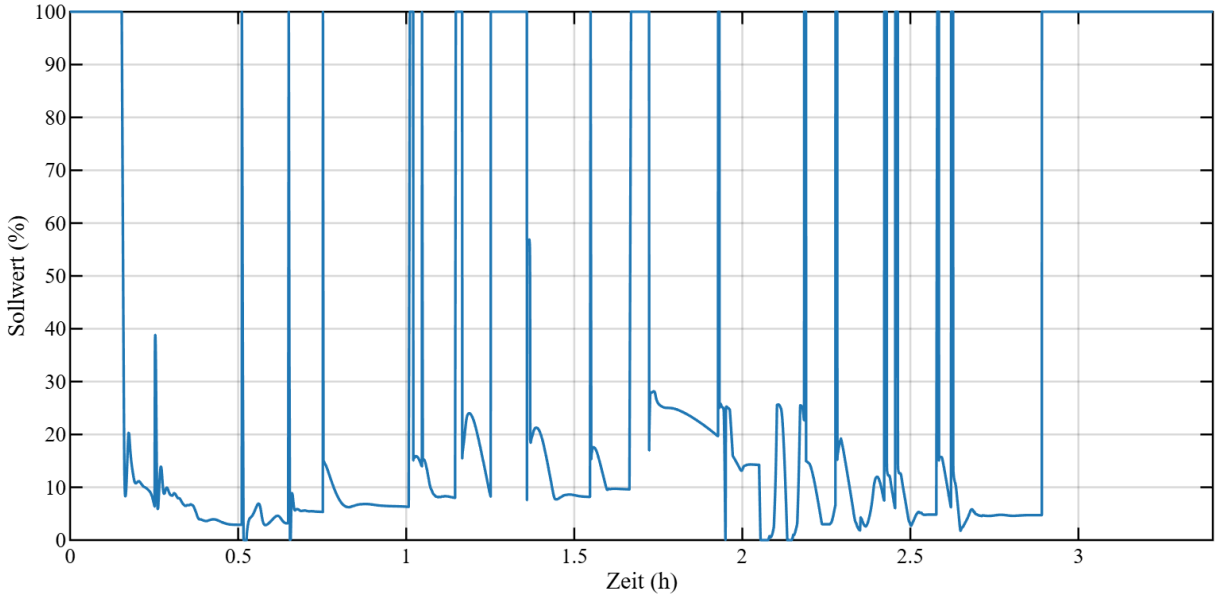
(c) Messung 22.04.26: Helium MFC — Massefluss



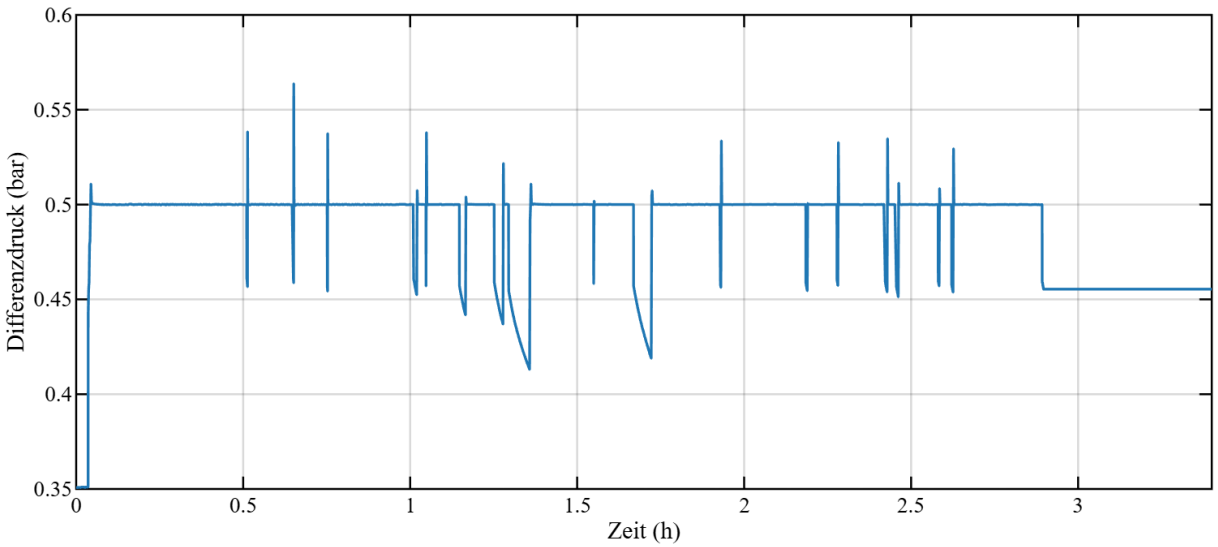
(a) Messung 22.04.26: Helium MFC — Gasvolumenfluss



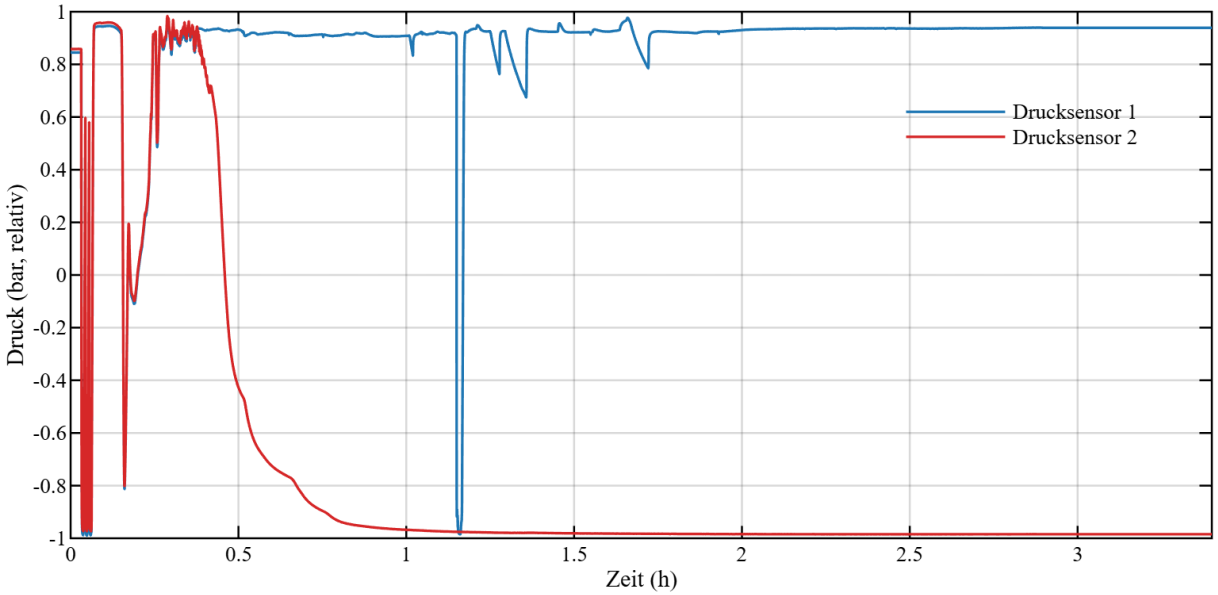
(b) Messung 22.04.26: Helium MFC — Flüssigvolumenfluss



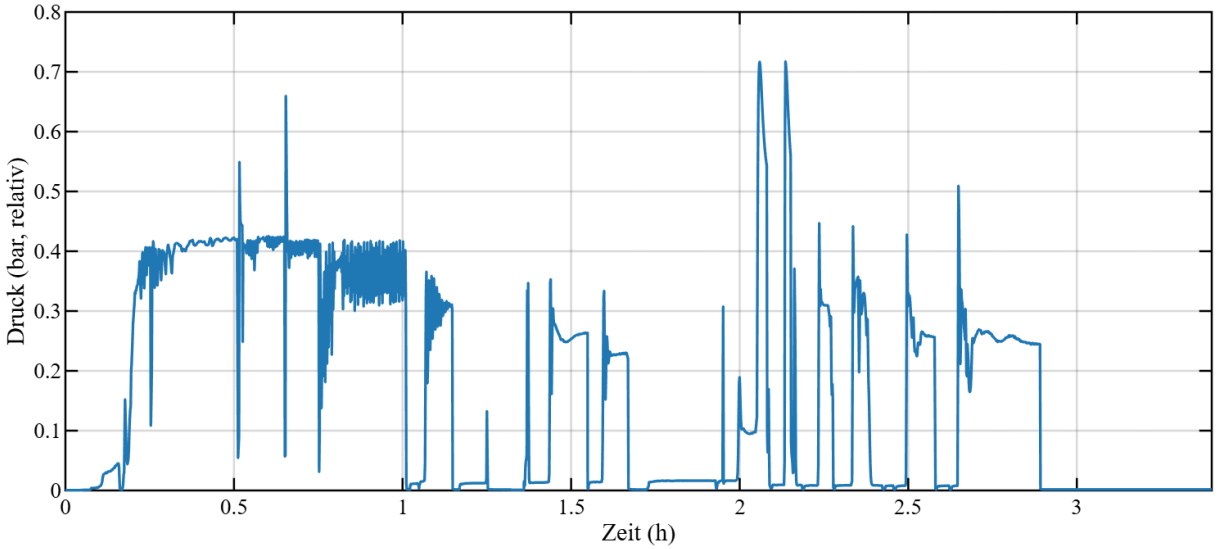
(c) Messung 22.04.26: Helium MFC — Sollwert



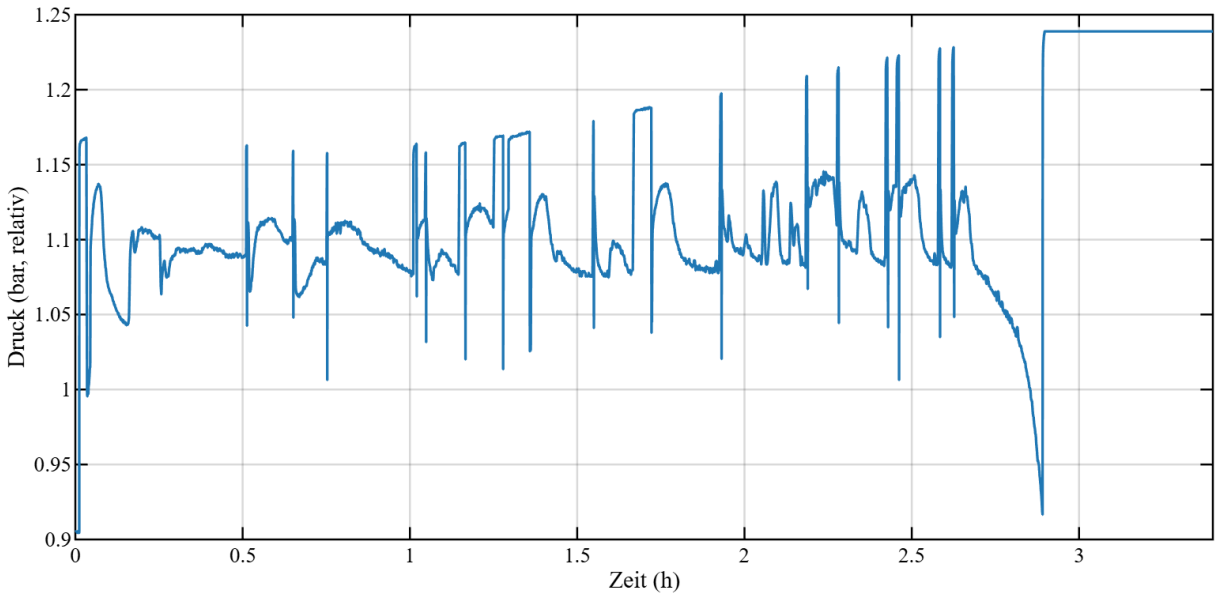
(a) Messung 22.04.26: Druckregler Helium



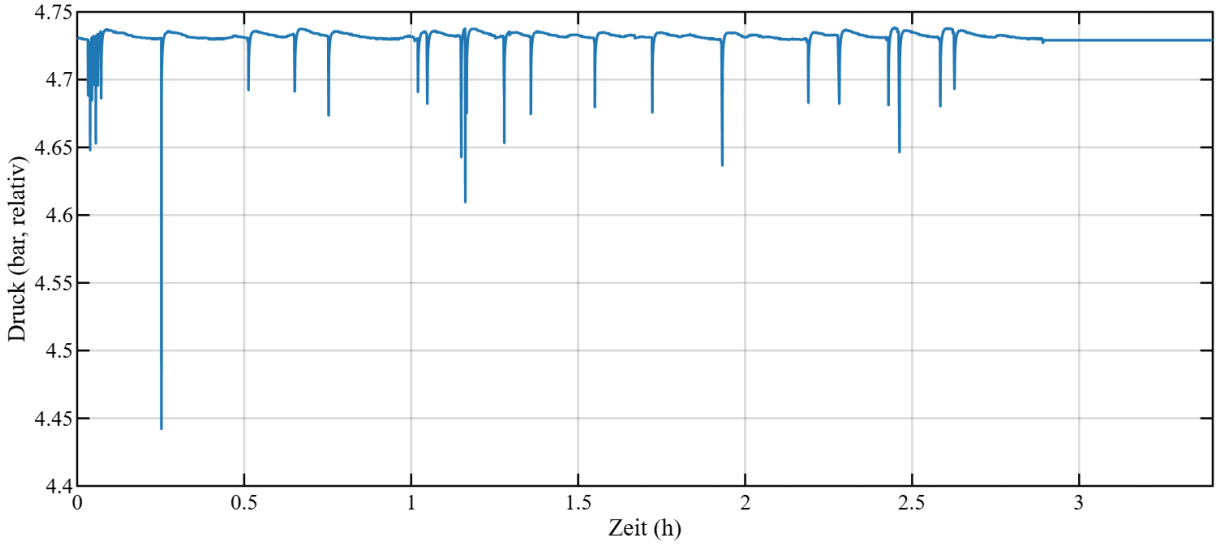
(b) Messung 22.04.26: Drucksensoren 1 und 2 (Moderatorgas Ein- und Ausgang)



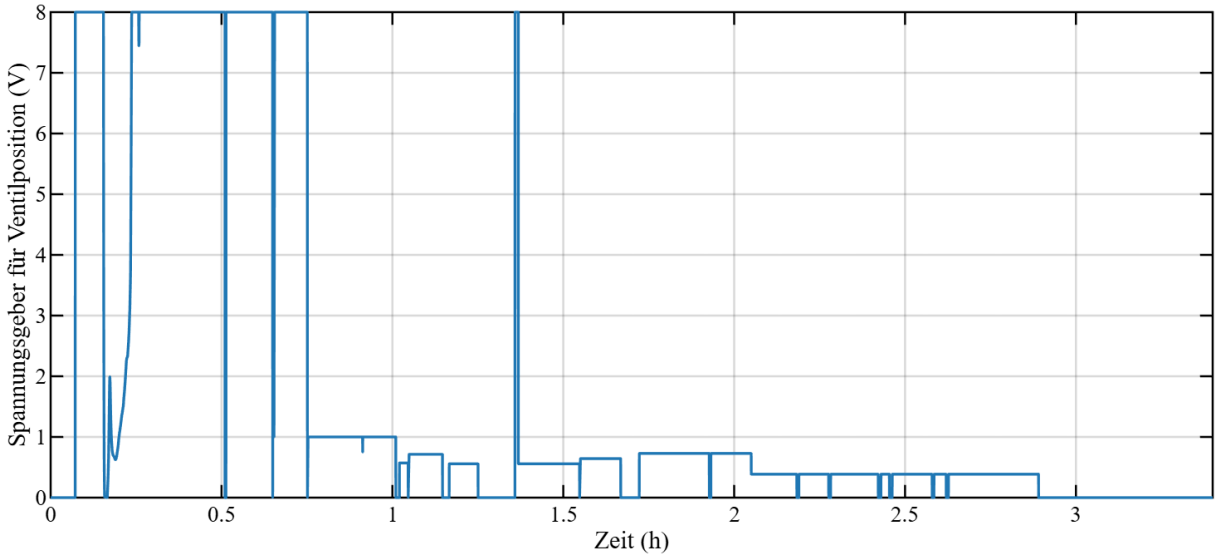
(c) Messung 22.04.26: Drucksensor 3 (Kühlgas Ausgang)



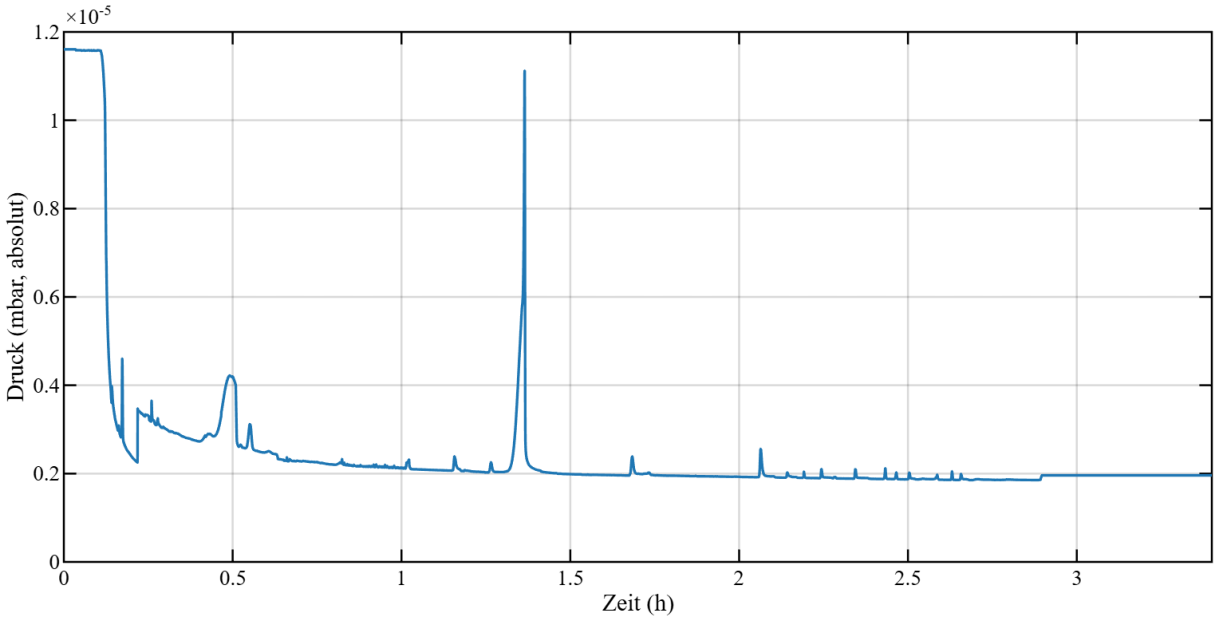
(a) Messung 22.04.26: Drucksensor 4 (Gasversorgung Kühlgas)



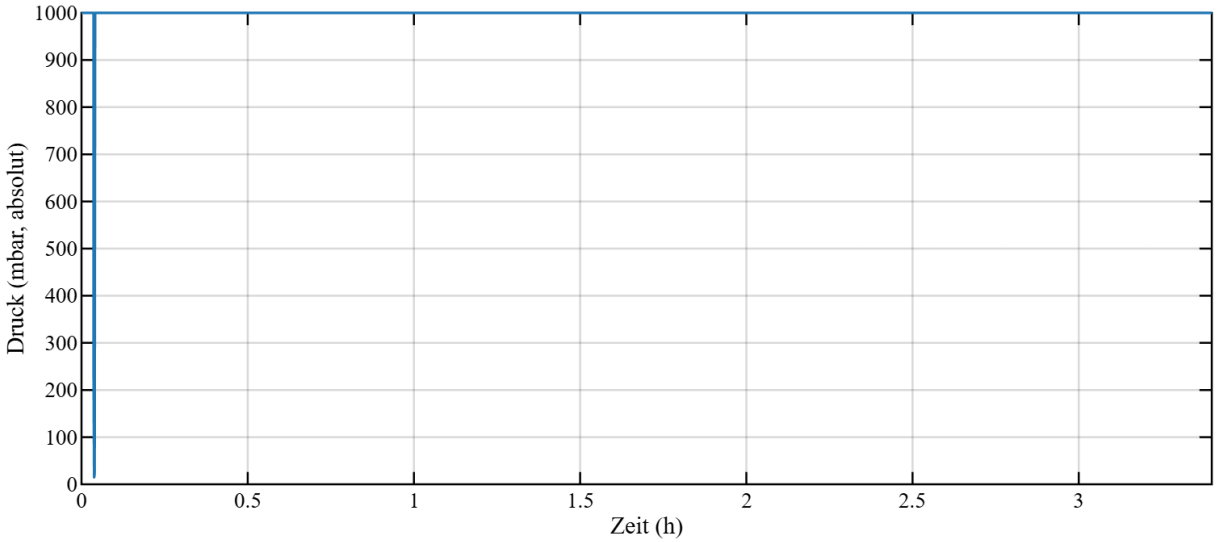
(b) Messung 22.04.26: Drucksensor Eingang (Druckluftversorgung)



(c) Messung 22.04.26: Spannungsgeber für den Transferheber

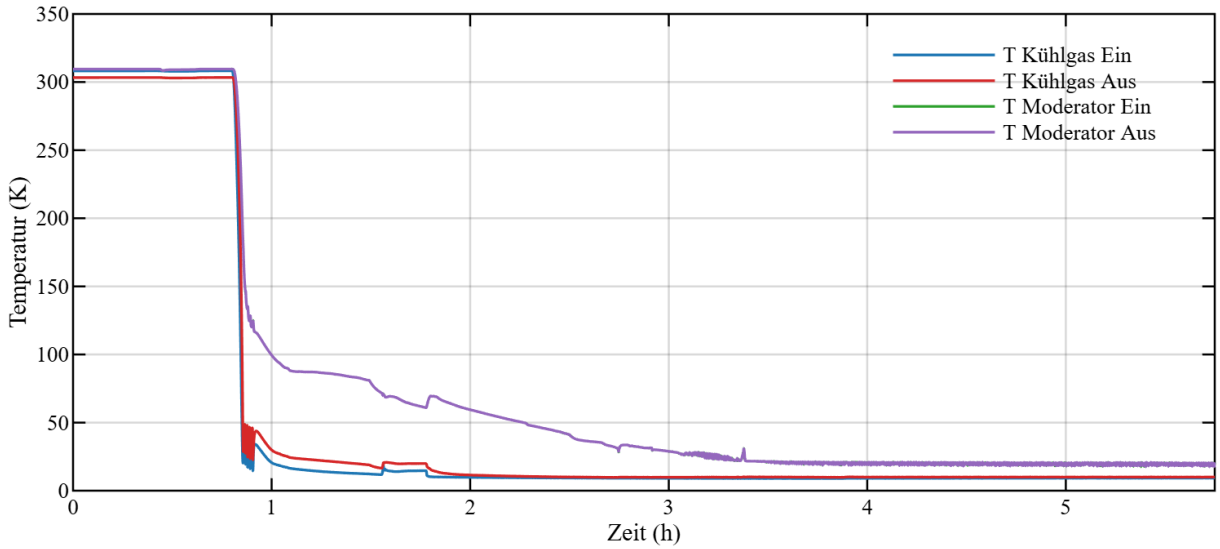


(a) Messung 22.04.26: Vakuummessröhre MPT200

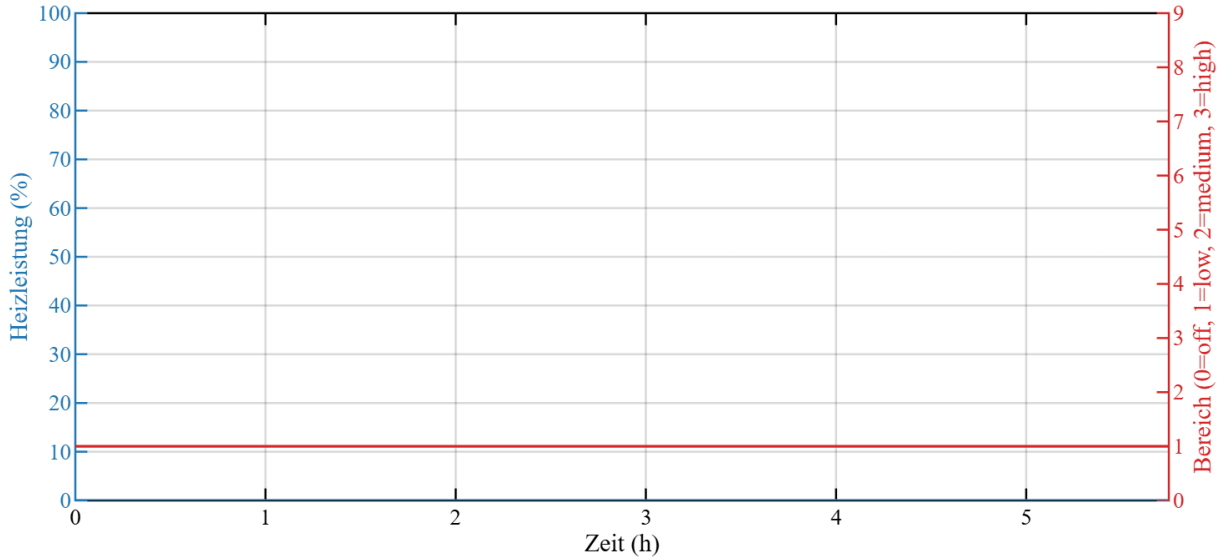


(b) Messung 22.04.26: Vakuummessröhre PPT200

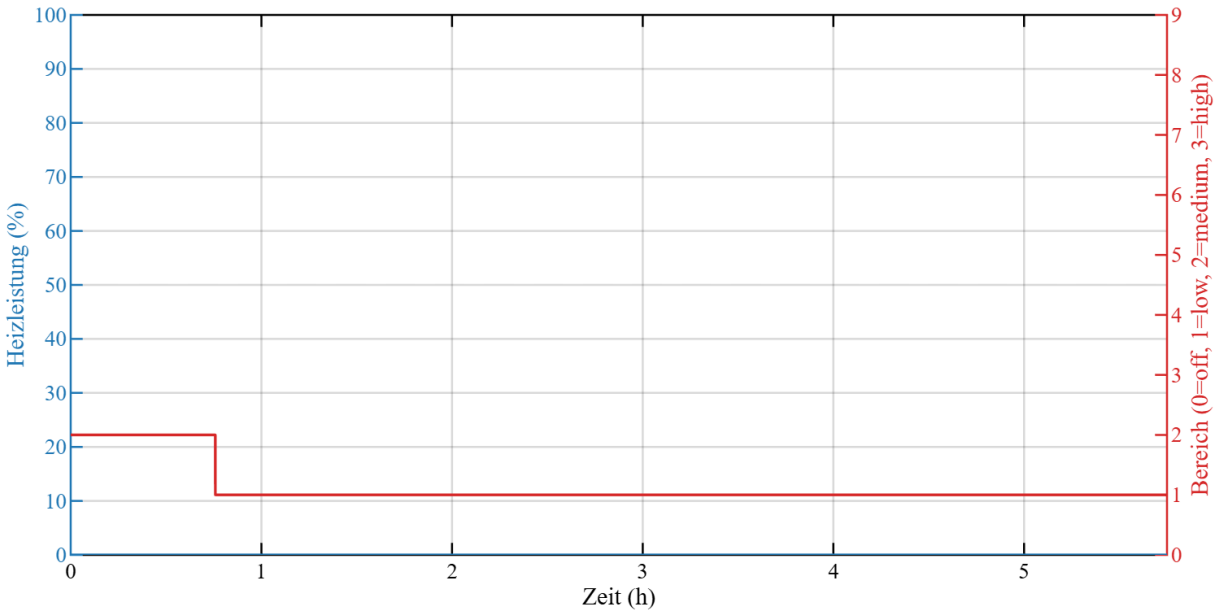
A.4 Messung 3: Wasserstoff (mit Helium gekühlt)



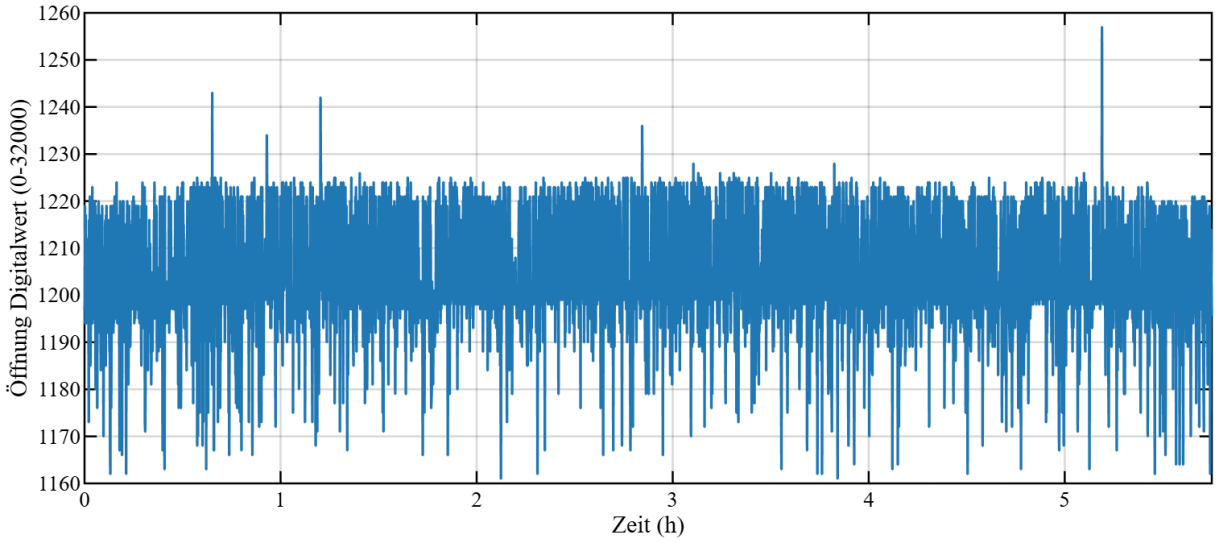
(a) Messung 24.04.26: Temperatursensoren (Grün und lila überlappen im ganzen Bereich)



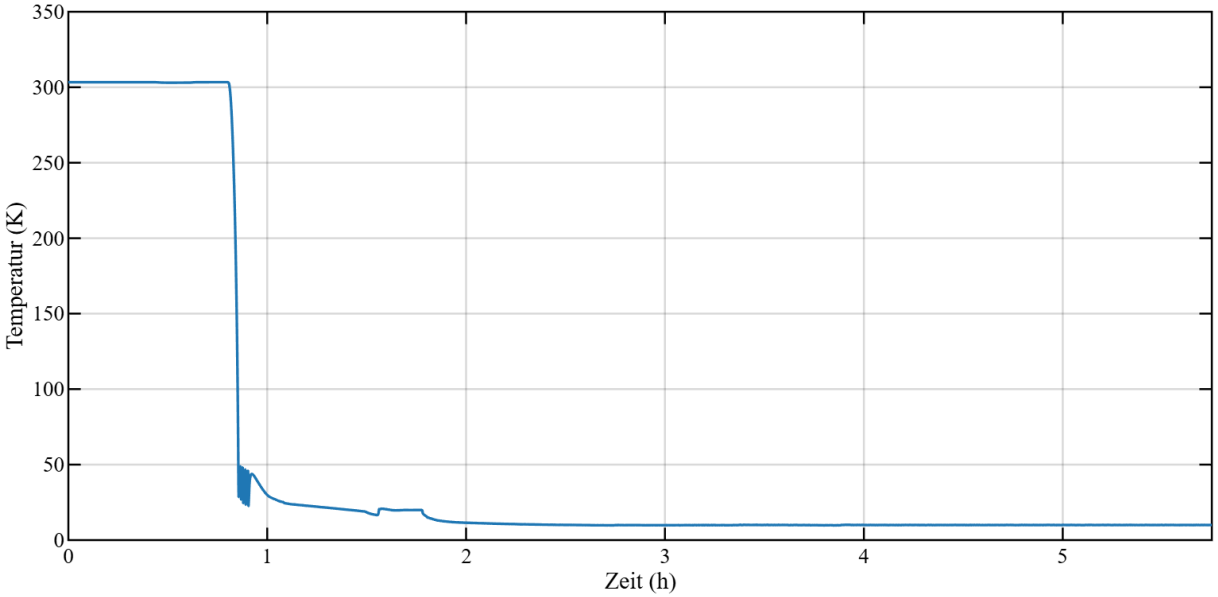
(b) Messung 24.04.26: Heizleistung und Bereich — Kühlgas Eingang



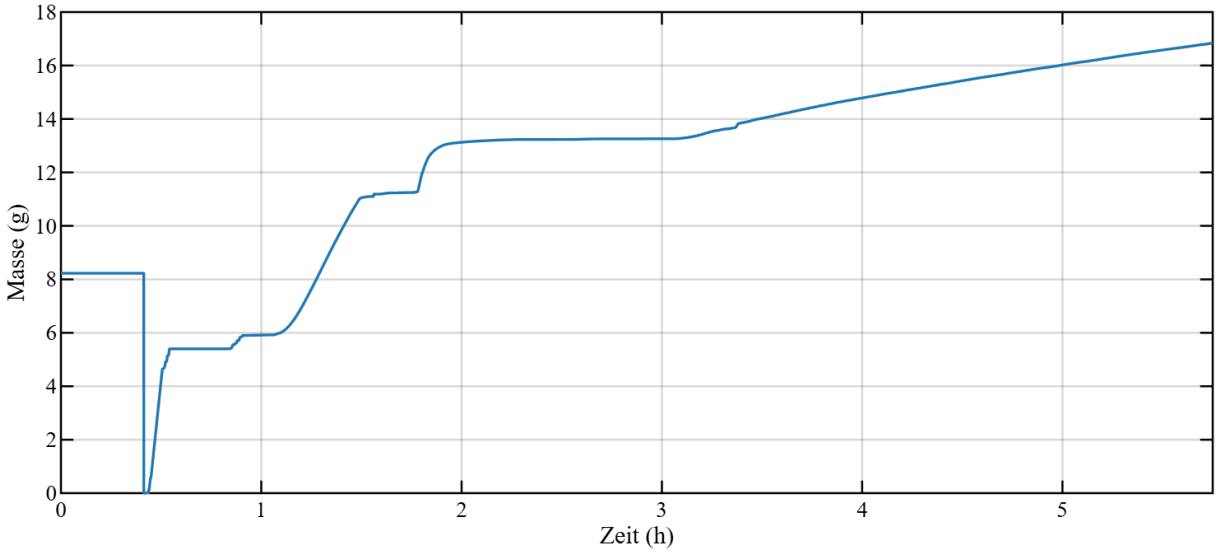
(a) Messung 24.04.26: Heizleistung und Bereich — Moderator Ausgang



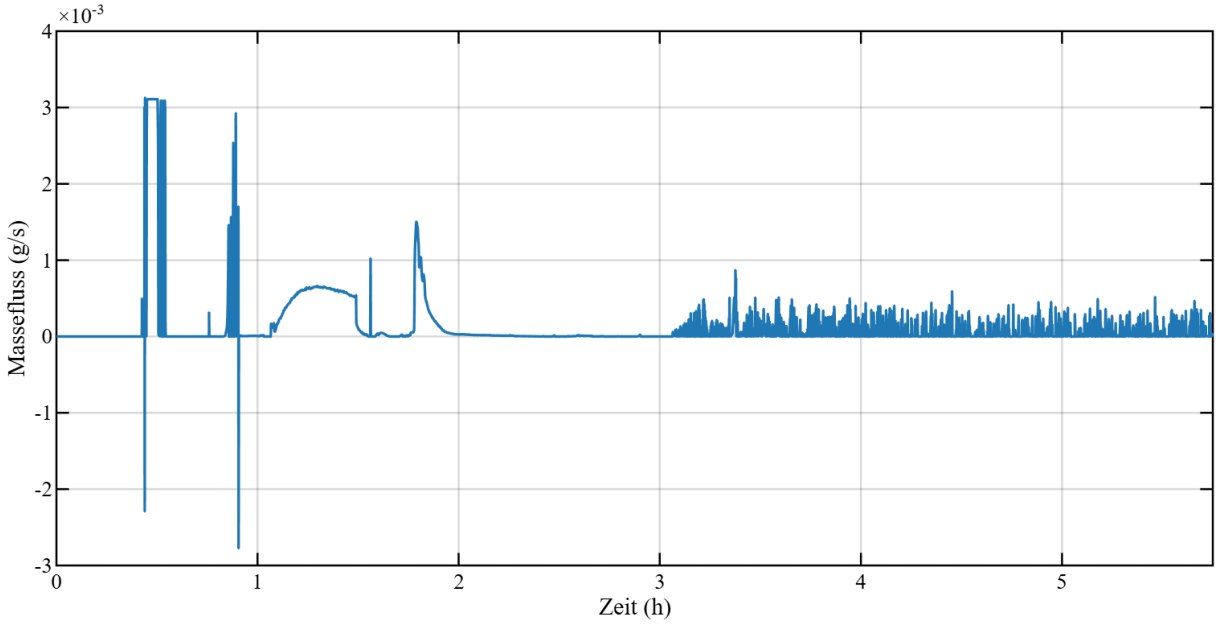
(b) Messung 24.04.26: Buerkert Druckregler



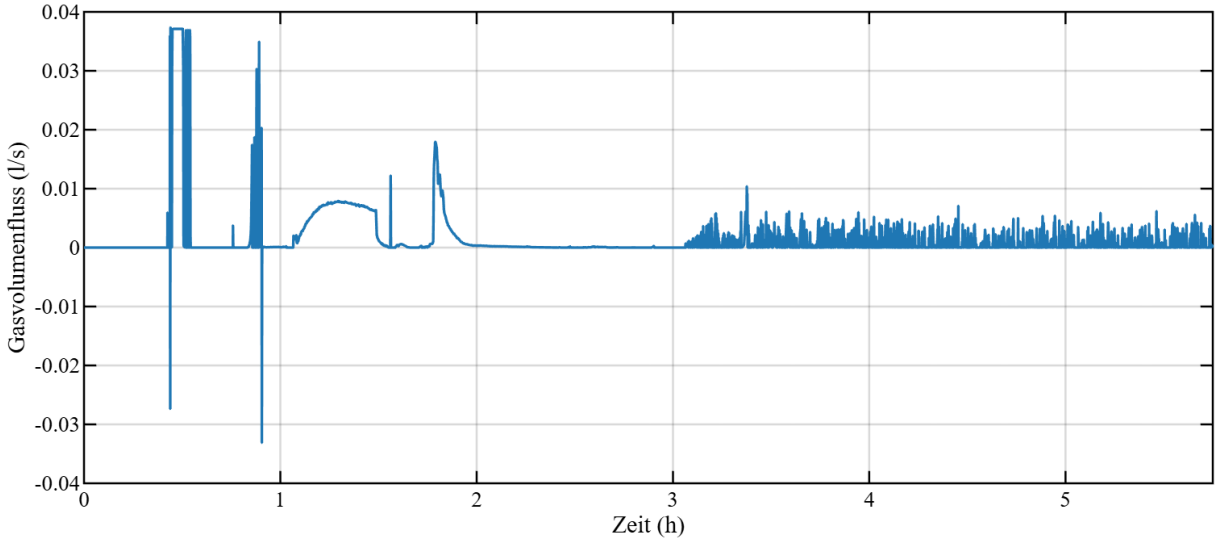
(c) Messung 24.04.26: Kryostat Temperatur - Regelgröße (Kühlgas Ausgang)



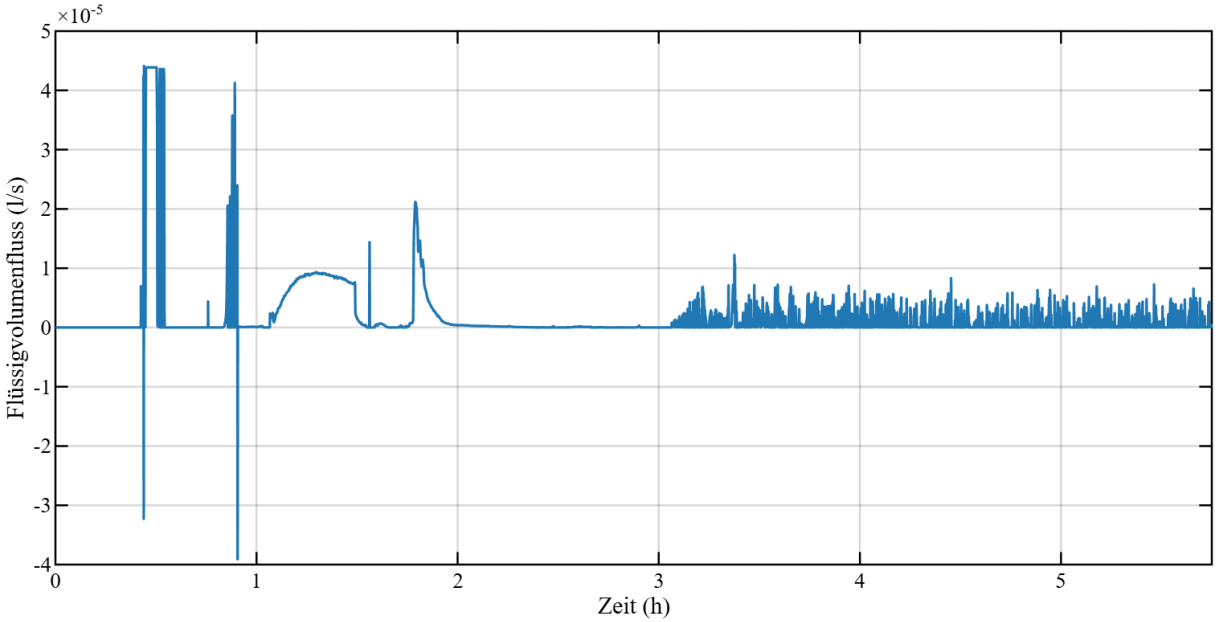
(a) Messung 24.04.26: Methan MFC — Masseintegral



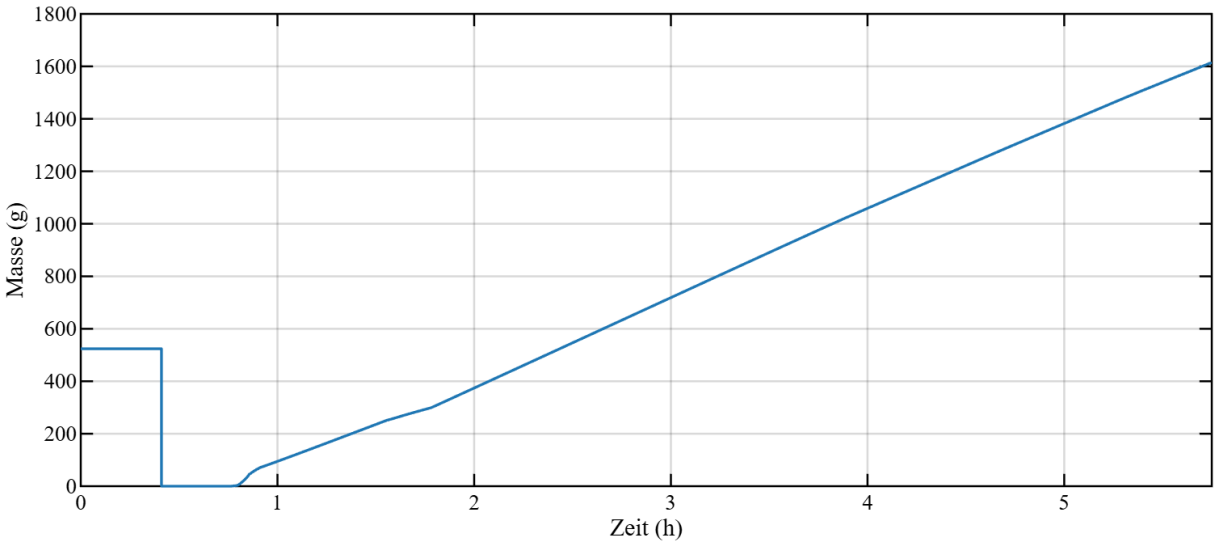
(b) Messung 24.04.26: Methan MFC — Massefluss



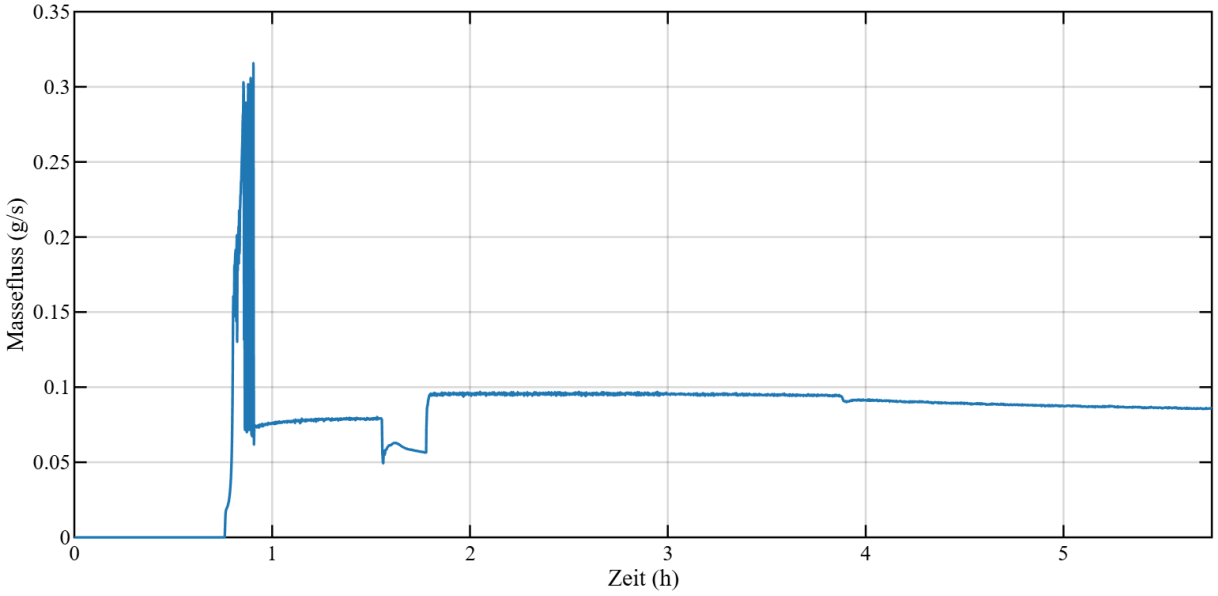
(c) Messung 24.04.26: Methan MFC — Gasvolumenfluss



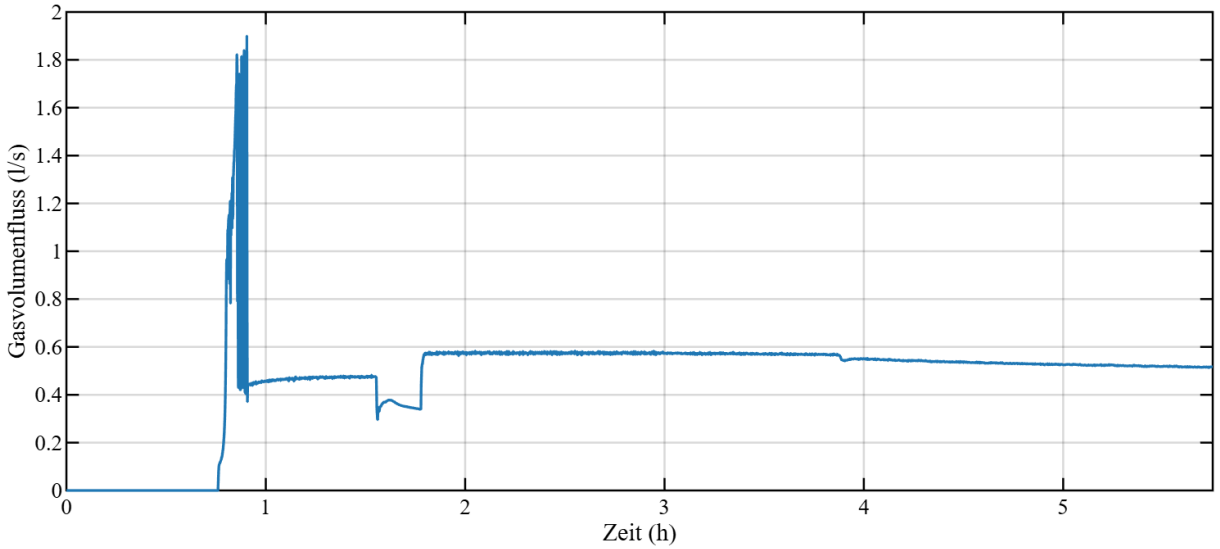
(a) Messung 24.04.26: Methan MFC — Flüssigvolumenfluss



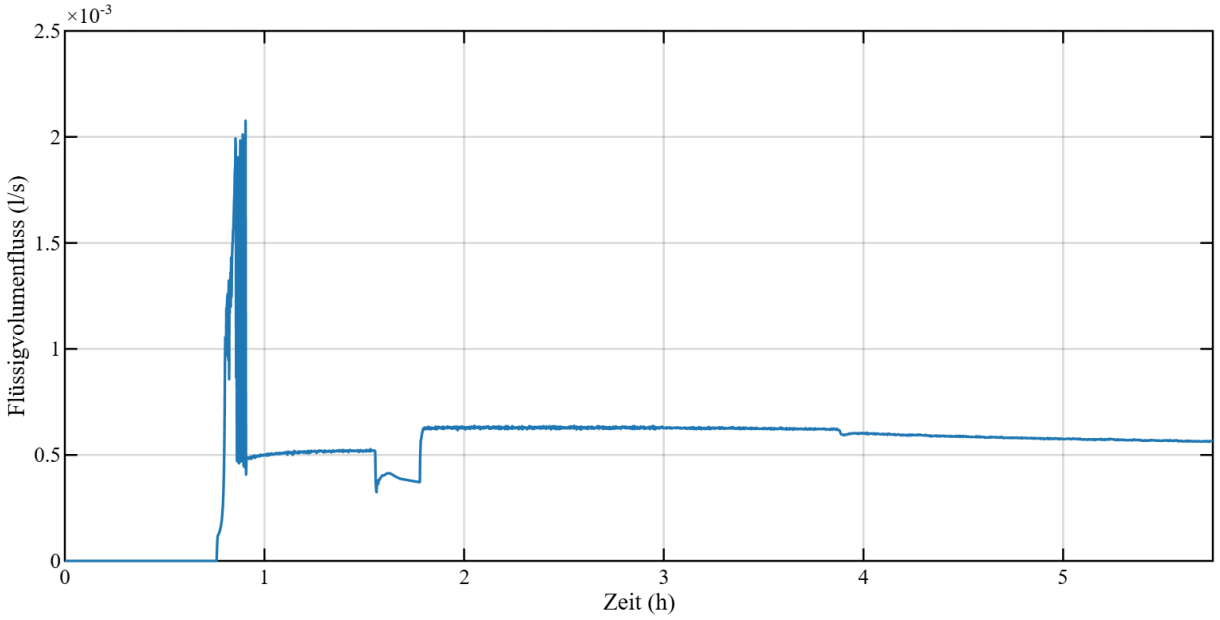
(b) Messung 24.04.26: Helium MFC — Masseintegral



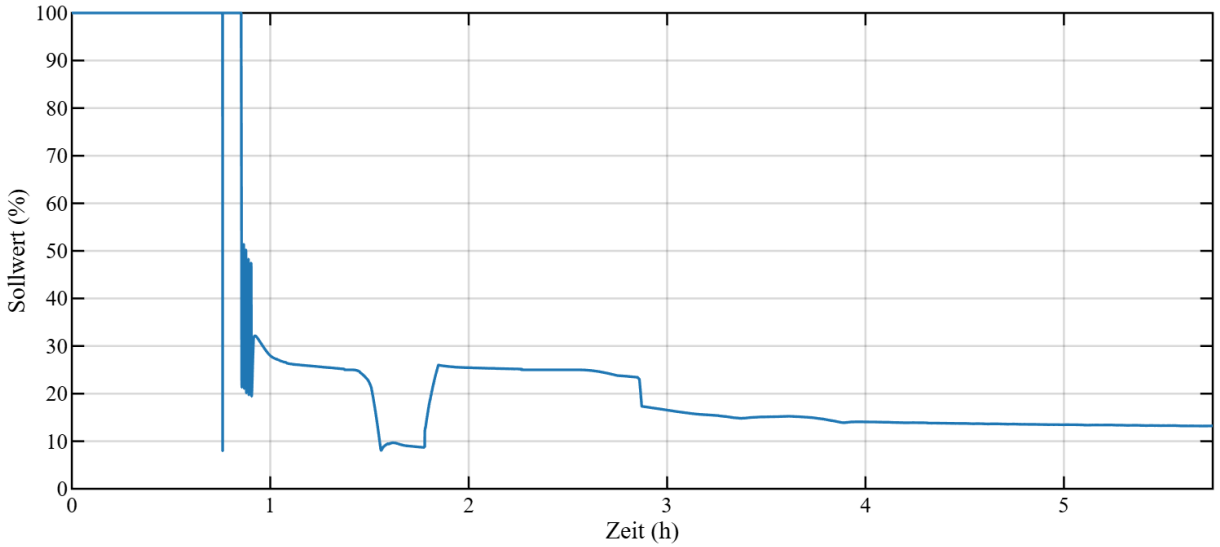
(c) Messung 24.04.26: Helium MFC — Massefluss



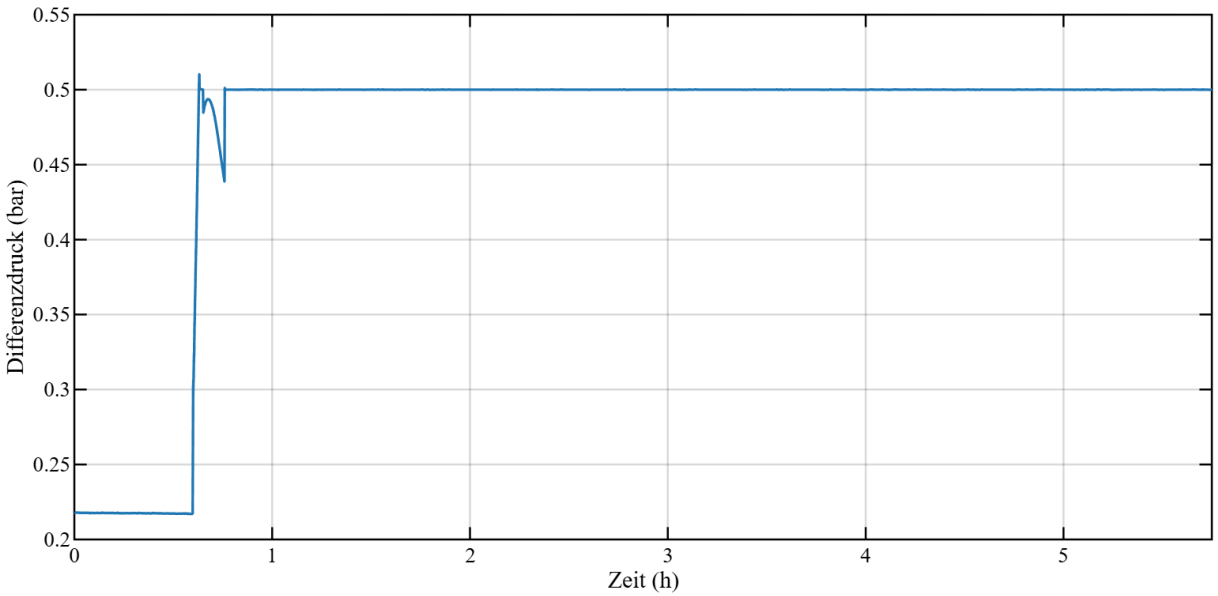
(a) Messung 24.04.26: Helium MFC — Gasvolumenfluss



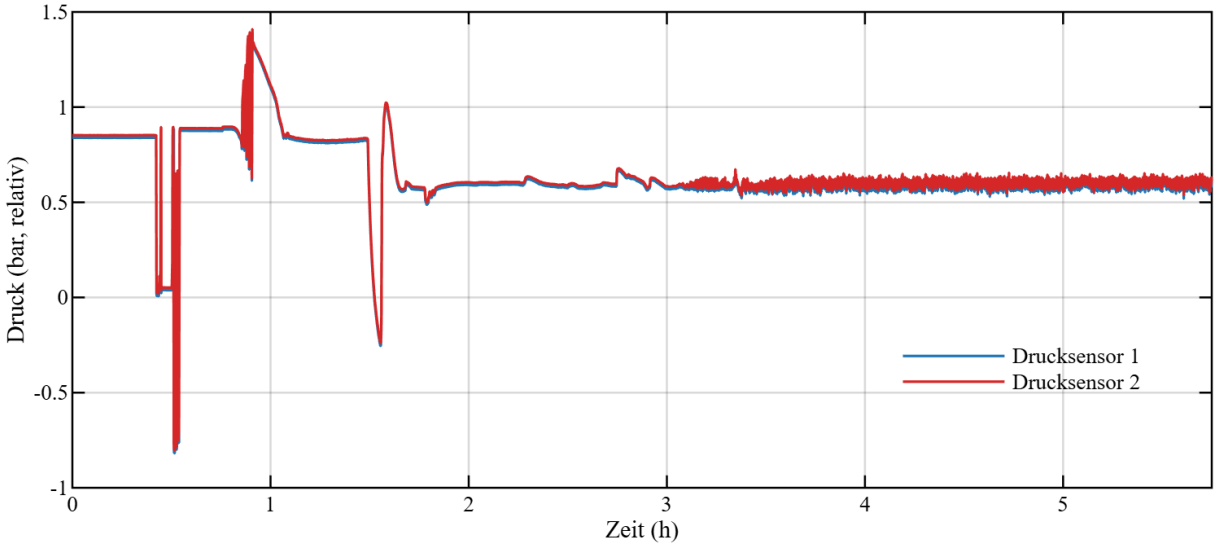
(b) Messung 24.04.26: Helium MFC — Flüssigvolumenfluss



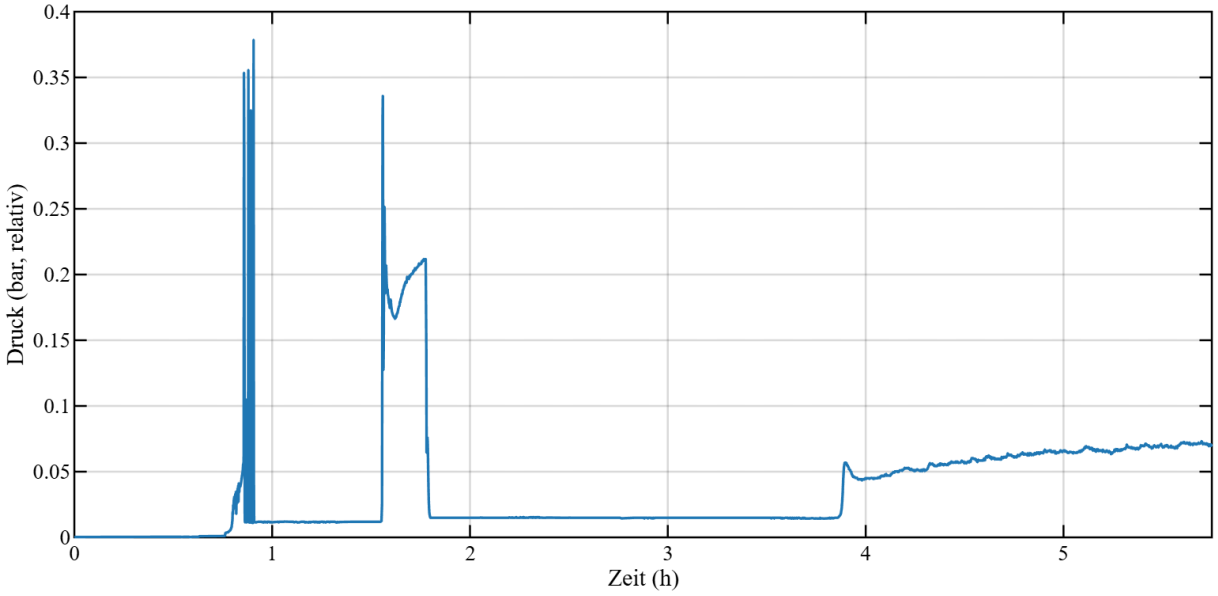
(c) Messung 24.04.26: Helium MFC — Sollwert



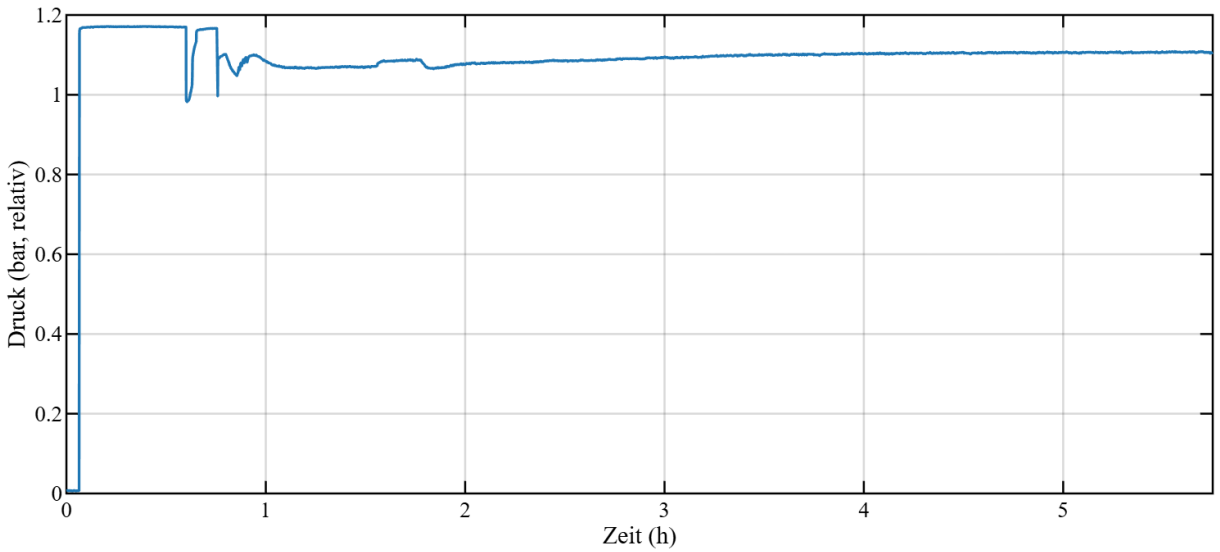
(a) Messung 24.04.26: Druckregler Helium



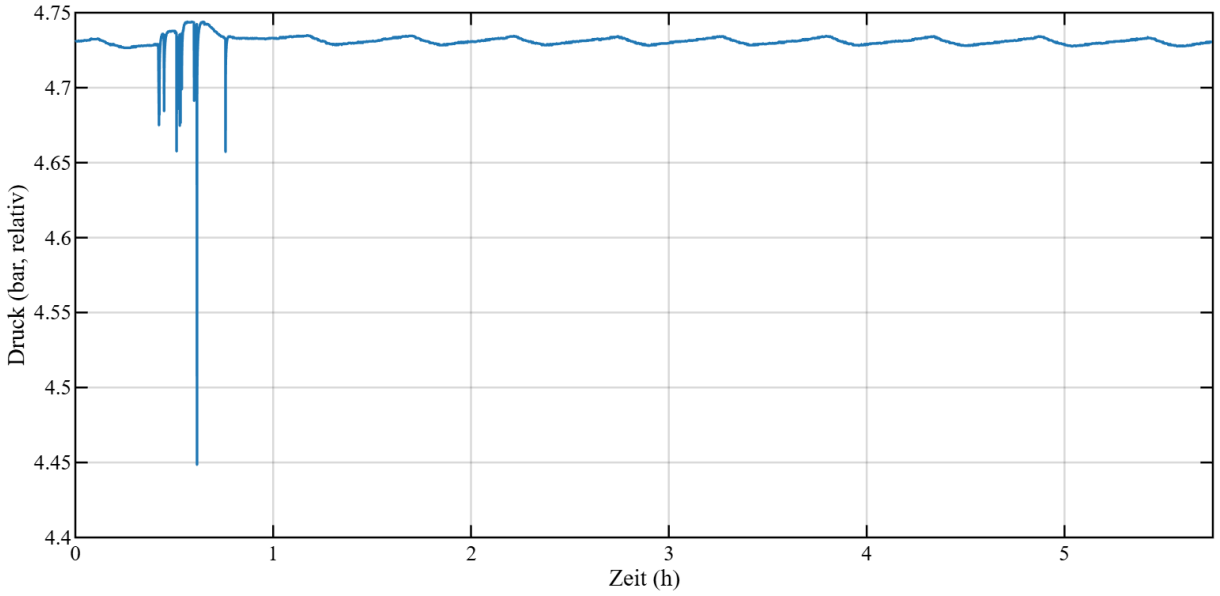
(b) Messung 24.04.26: Drucksensoren 1 und 2 (Moderatorgas Ein- und Ausgang)



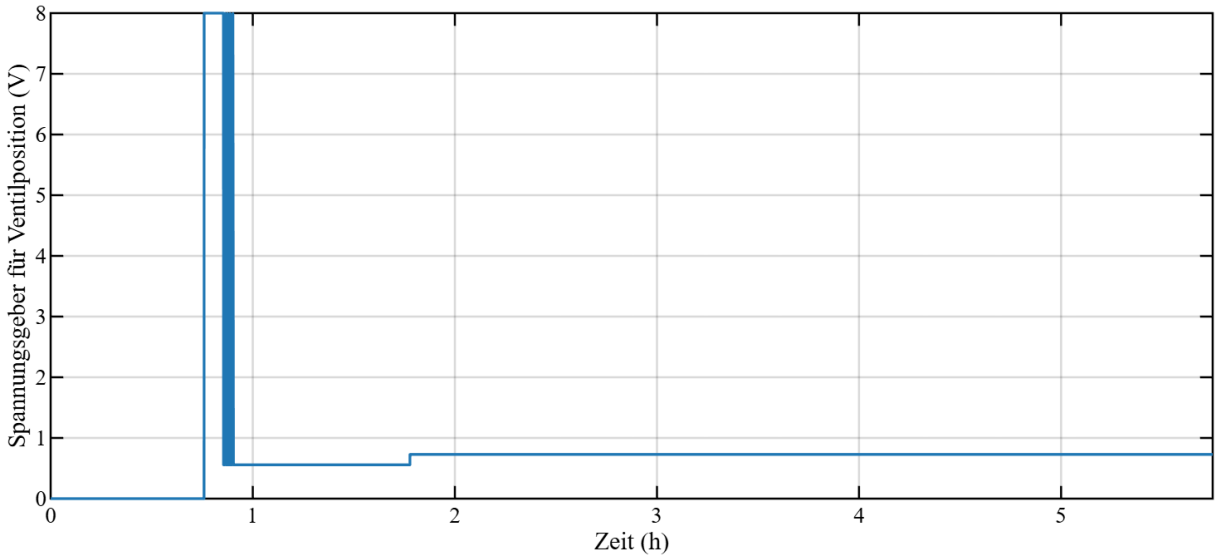
(c) Messung 24.04.26: Drucksensor 3 (Kühlgas Ausgang)



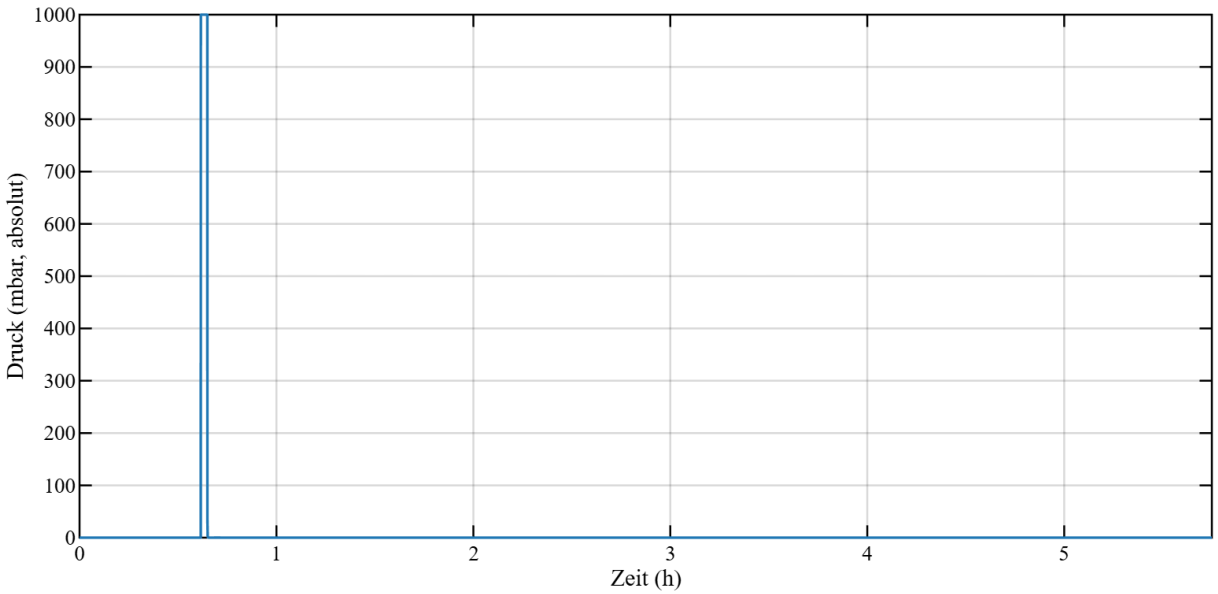
(a) Messung 24.04.26: Drucksensor 4 (Gasversorgung Kühlgas)



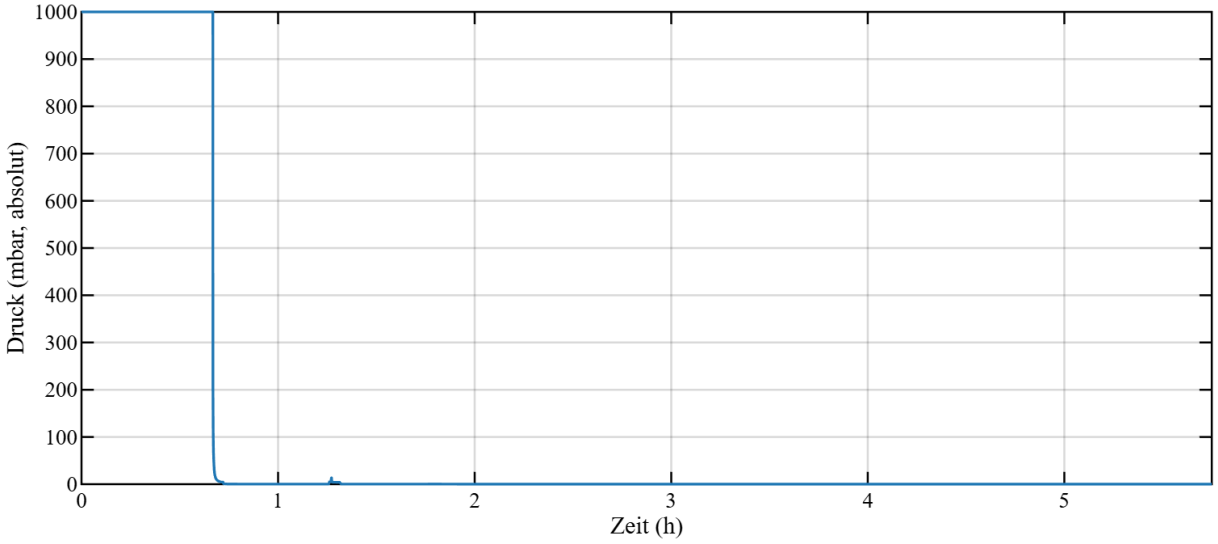
(b) Messung 24.04.26: Drucksensor Eingang (Druckluftversorgung)



(c) Messung 24.04.26: Spannungsgeber für den Transferheber

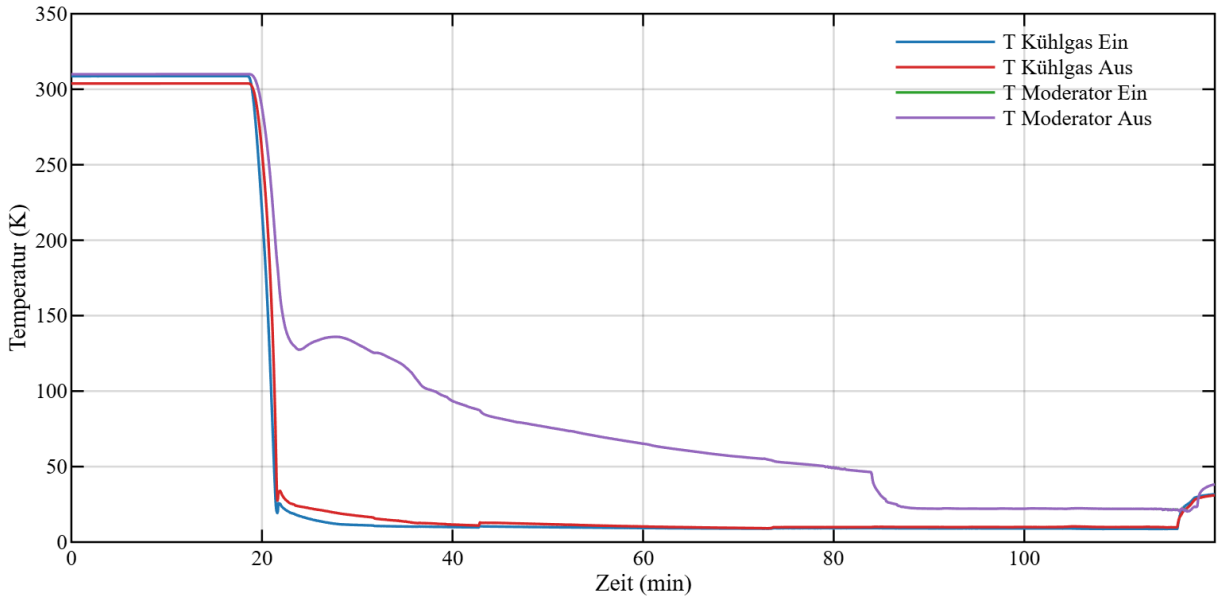


(a) Messung 24.04.26: Vakuummessröhre MPT200

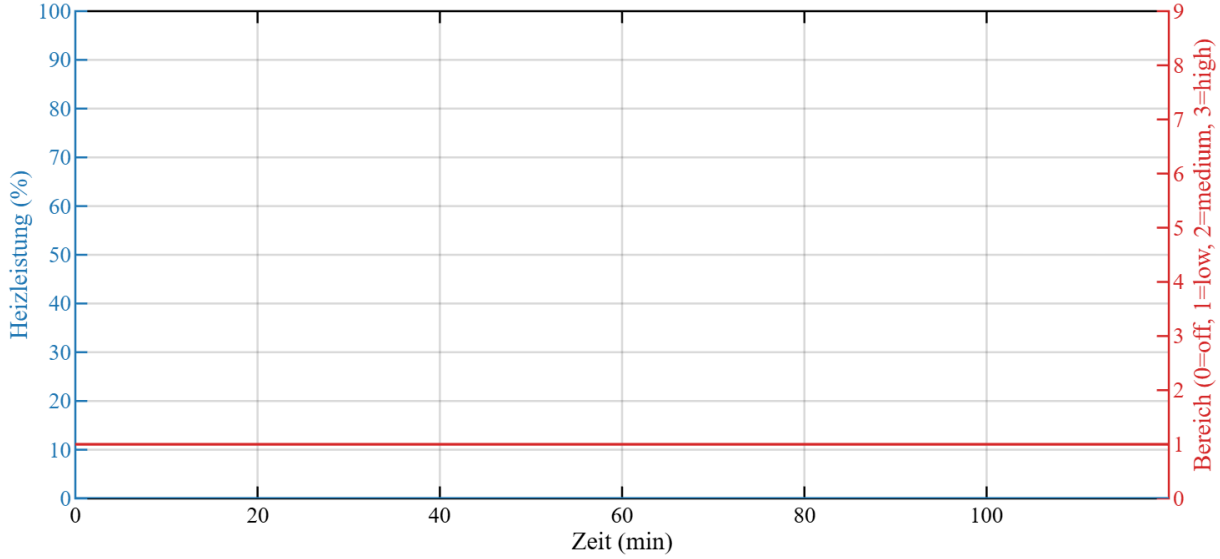


(b) Messung 24.04.26: Vakuummessröhre PPT200

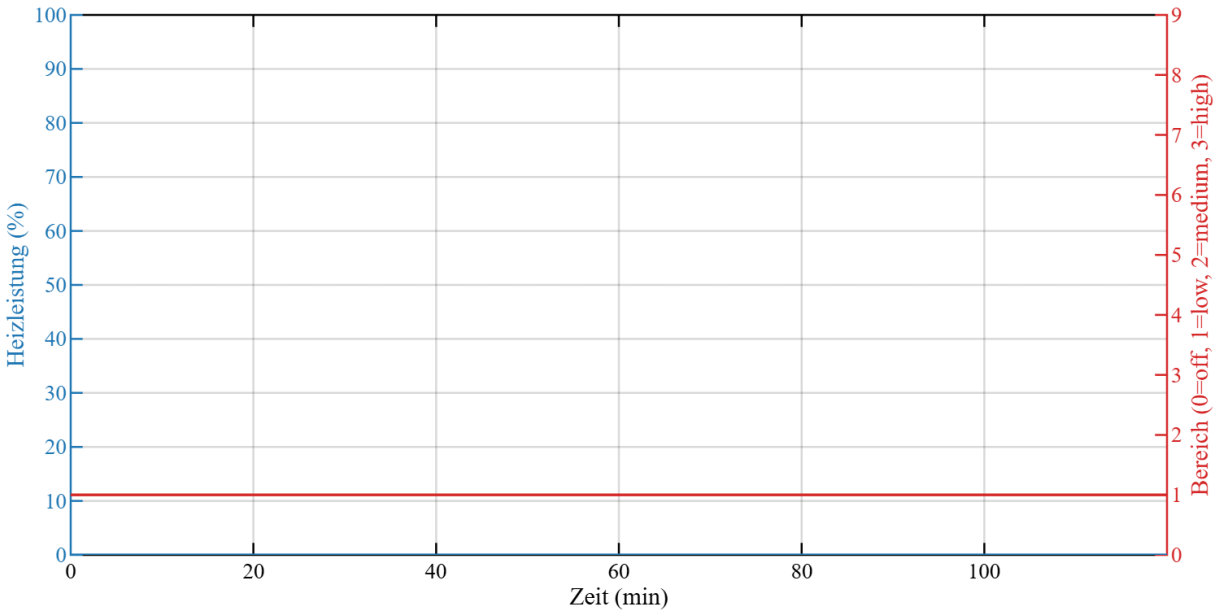
A.5 Messung 3: Wasserstoff (mit Helium gekühlt)



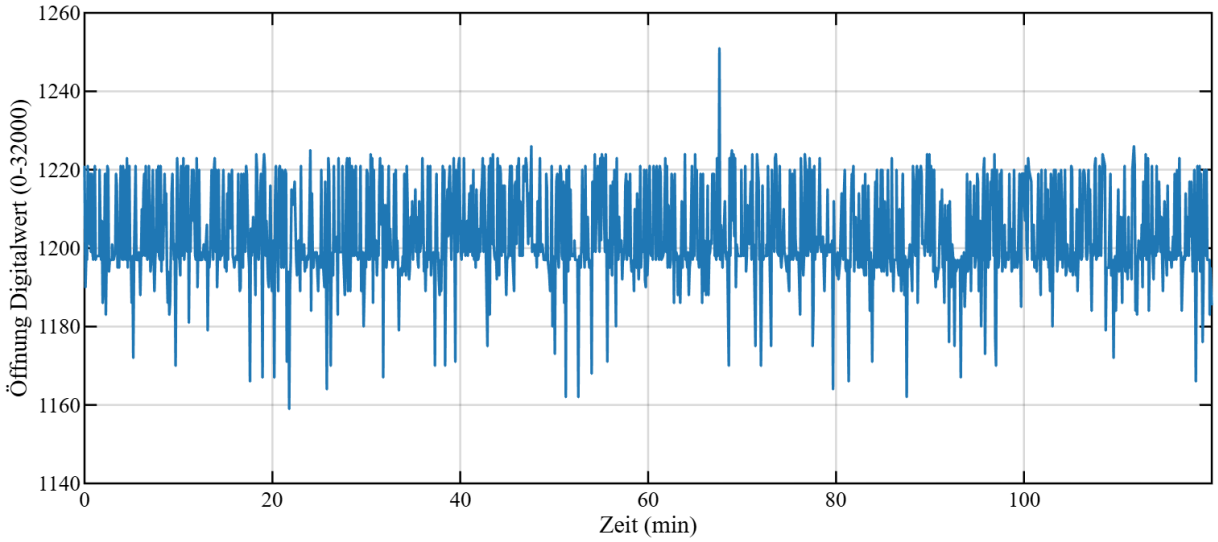
(a) Messung 29.04.26: Temperatursensoren (Grün und lila überlappen im ganzen Bereich)



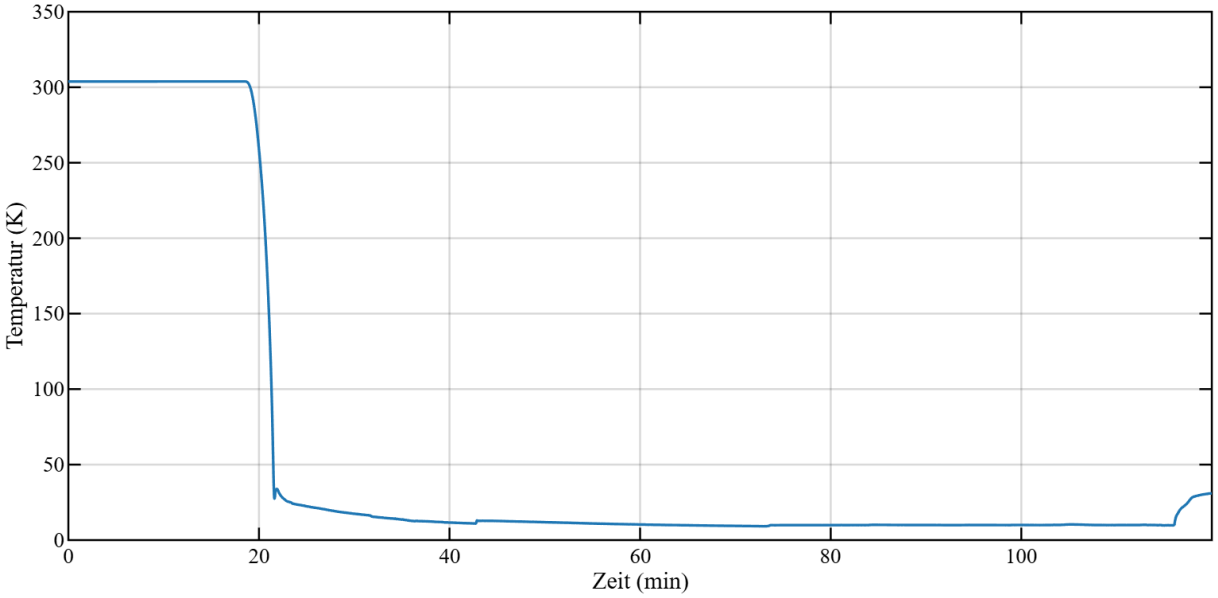
(b) Messung 29.04.26: Heizleistung und Bereich — Kühlgas Eingang



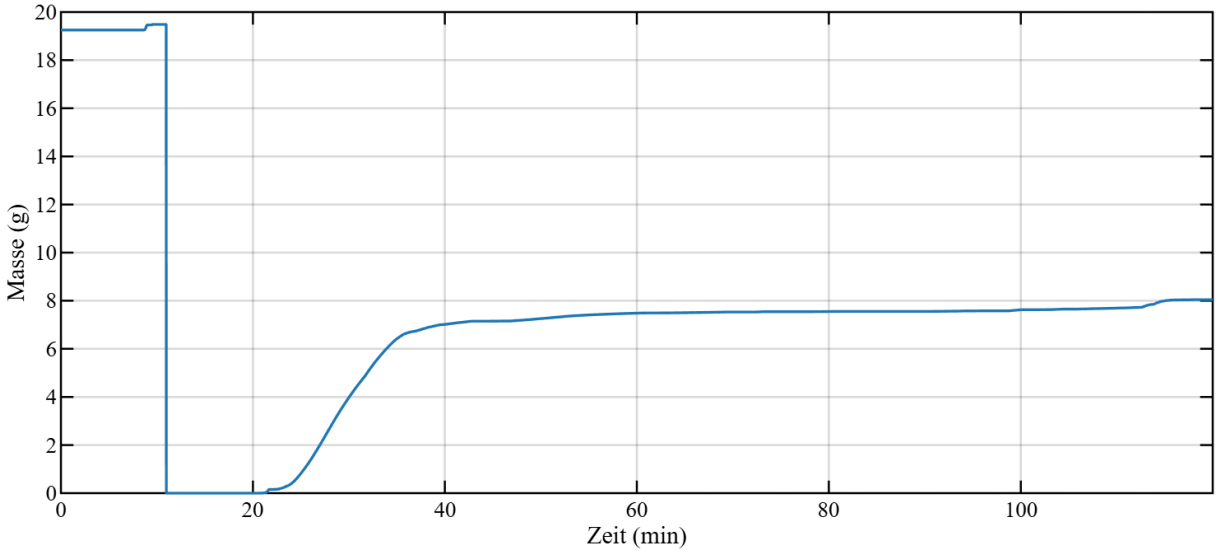
(a) Messung 29.04.26: Heizleistung und Bereich — Moderator Ausgang



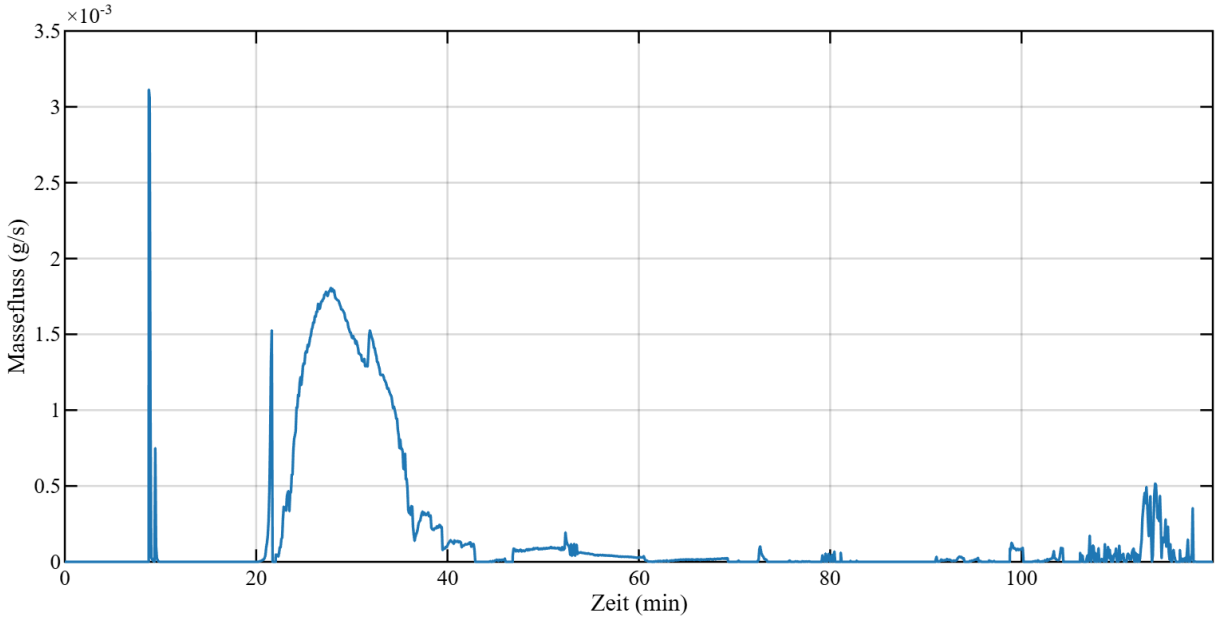
(b) Messung 29.04.26: Buerkert Druckregler



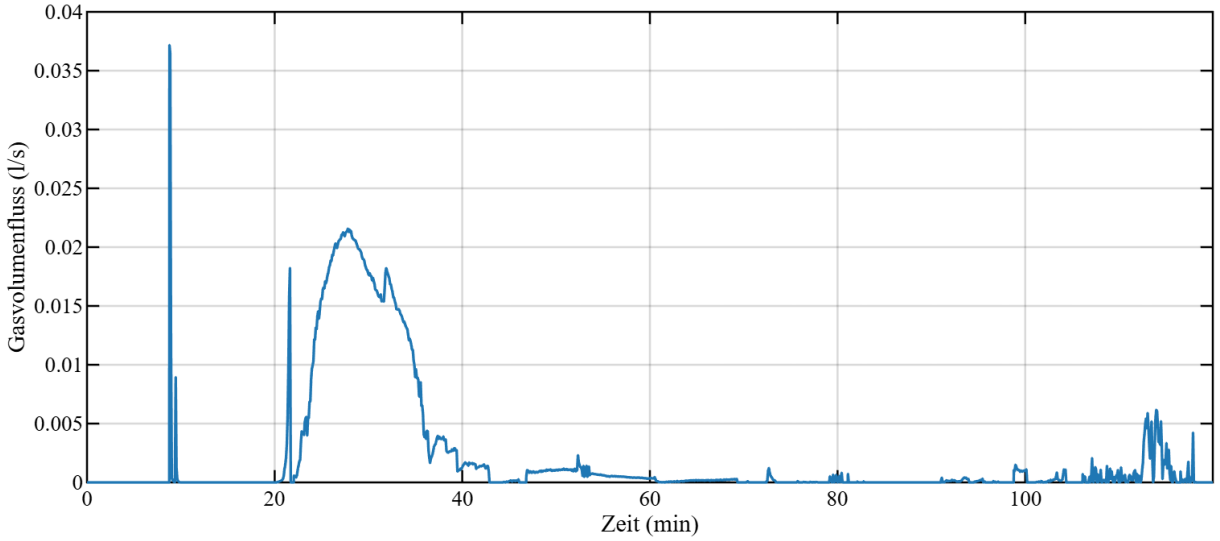
(c) Messung 29.04.26: Kryostat Temperatur - Regelgröße (Kühlgas Ausgang)



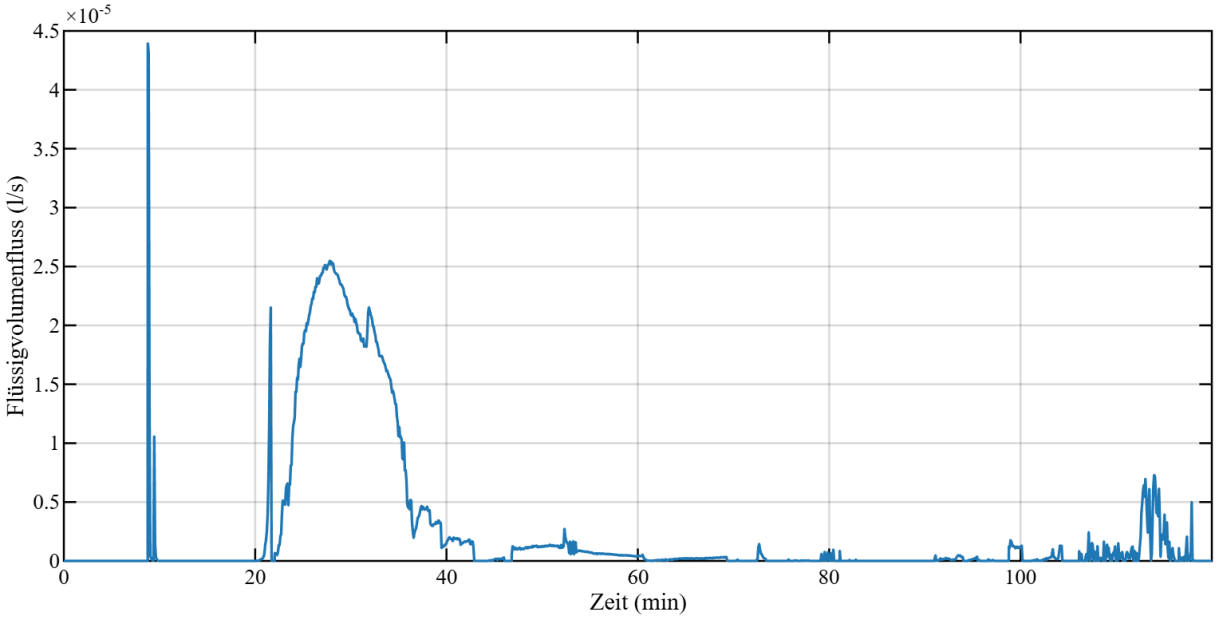
(a) Messung 29.04.26: Methan MFC — Masseintegral



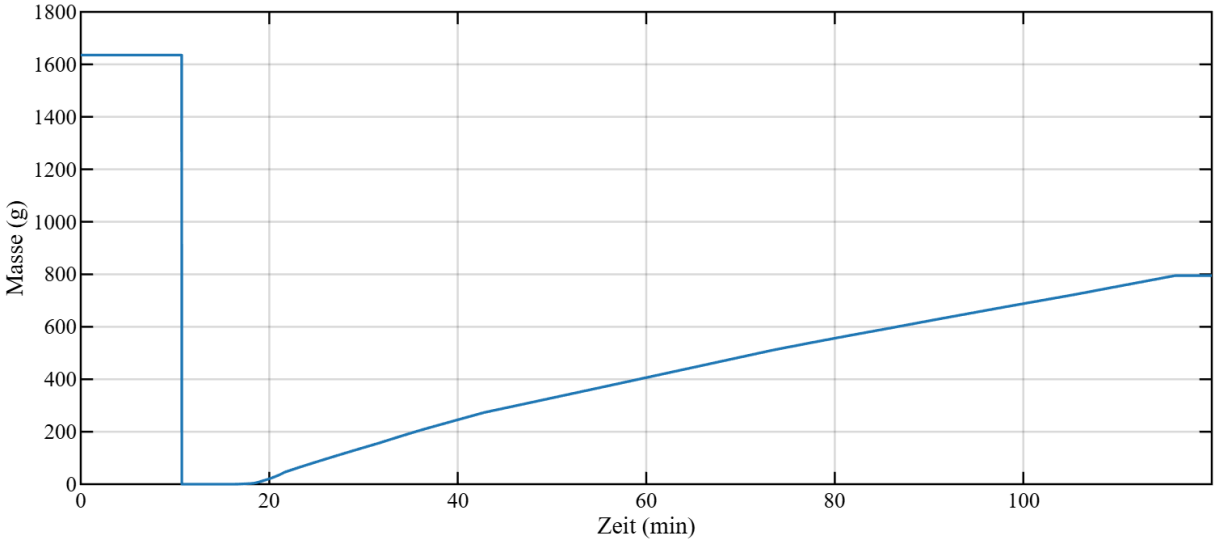
(b) Messung 29.04.26: Methan MFC — Massefluss



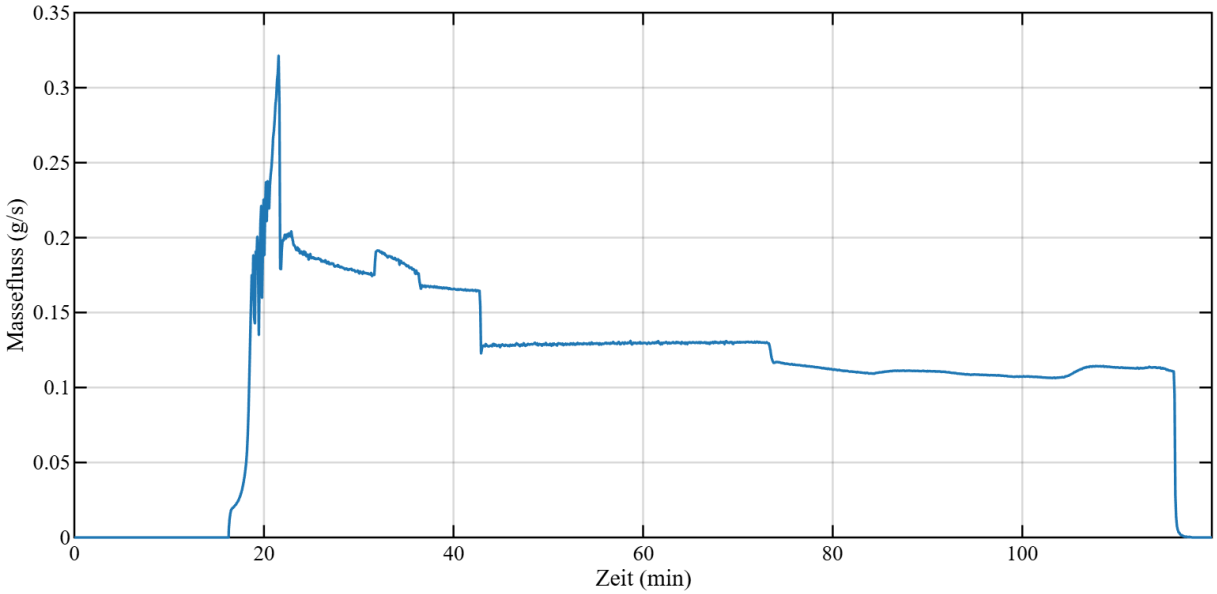
(c) Messung 29.04.26: Methan MFC — Gasvolumenfluss



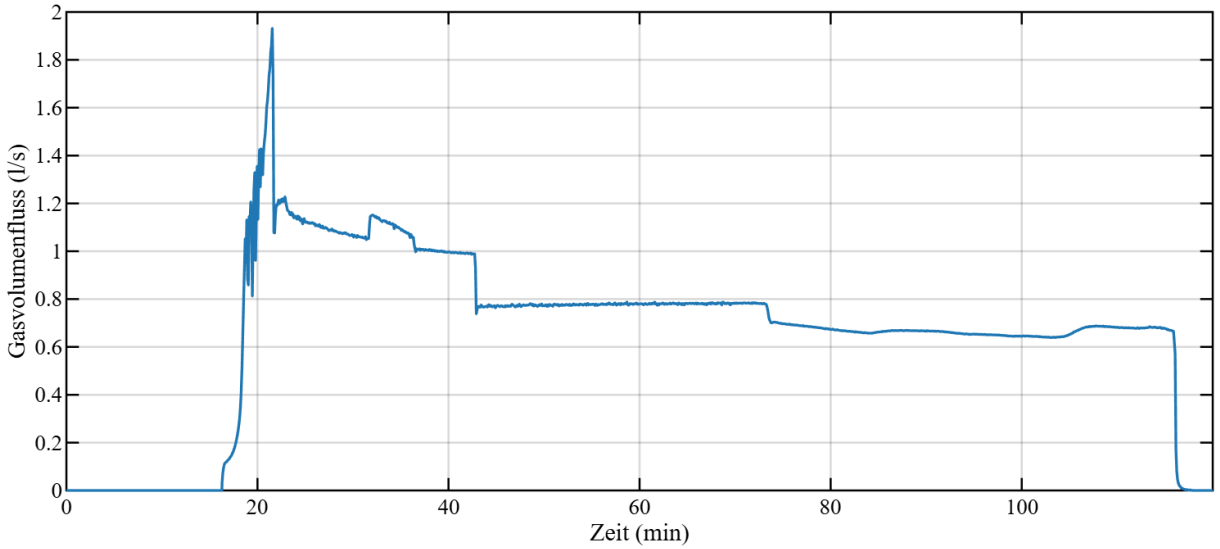
(a) Messung 29.04.26: Methan MFC — Flüssigvolumenfluss



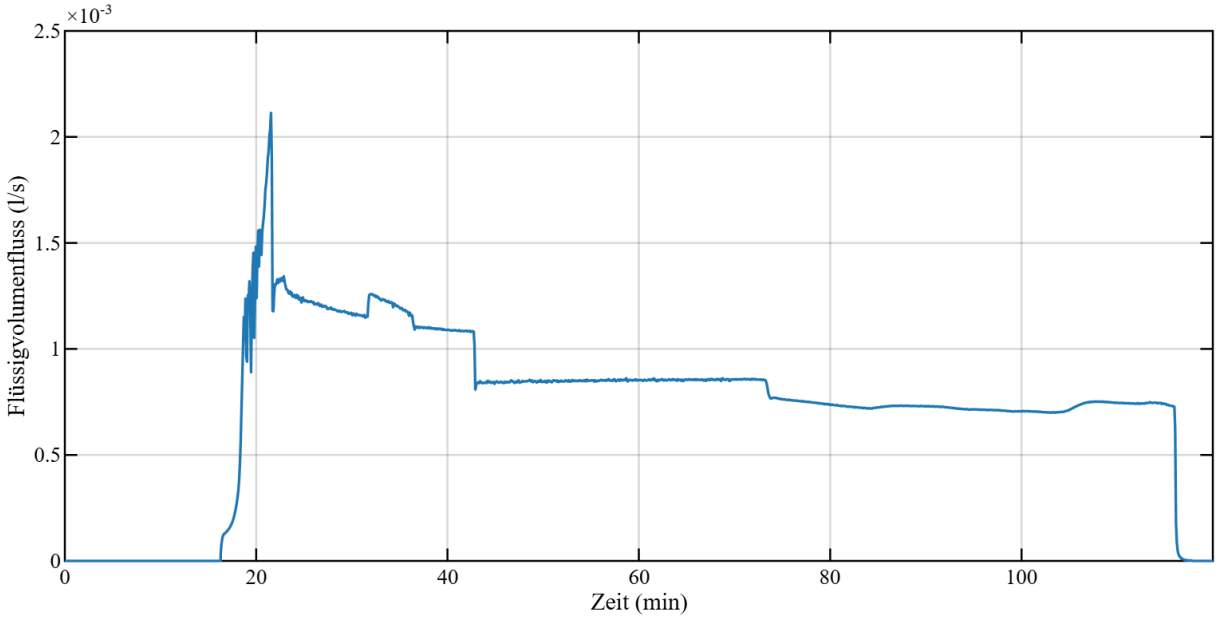
(b) Messung 29.04.26: Helium MFC — Masseintegral



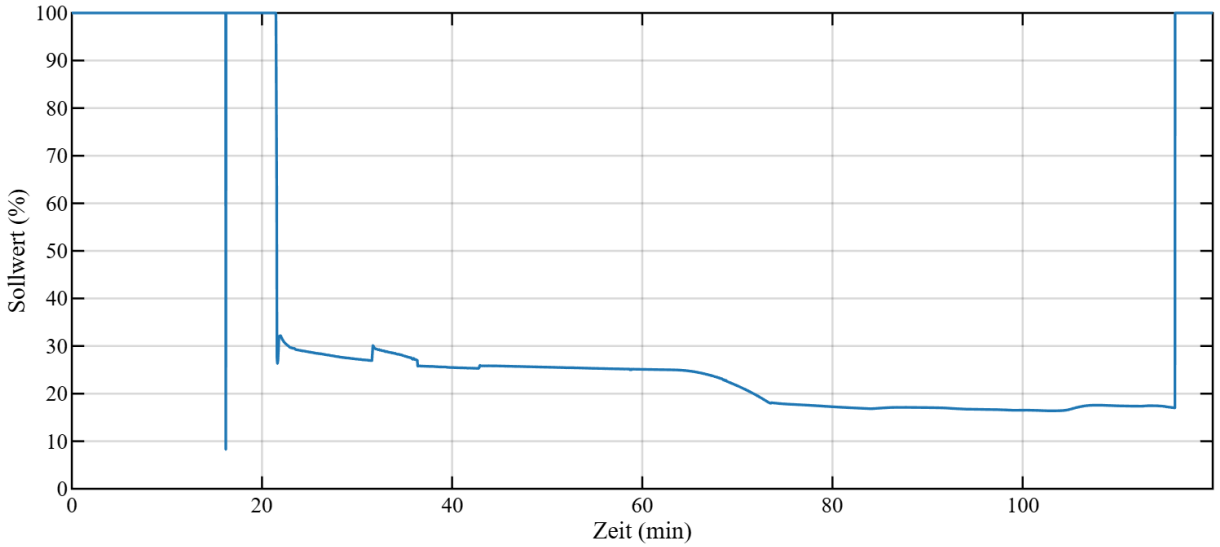
(c) Messung 29.04.26: Helium MFC — Massefluss



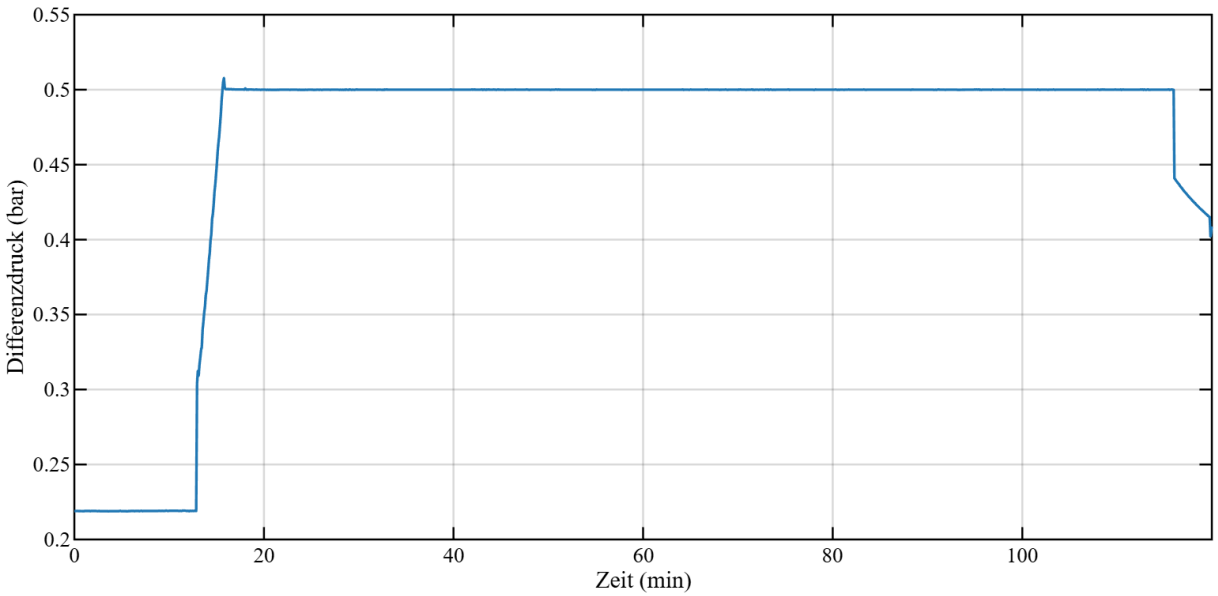
(a) Messung 29.04.26: Helium MFC — Gasvolumenfluss



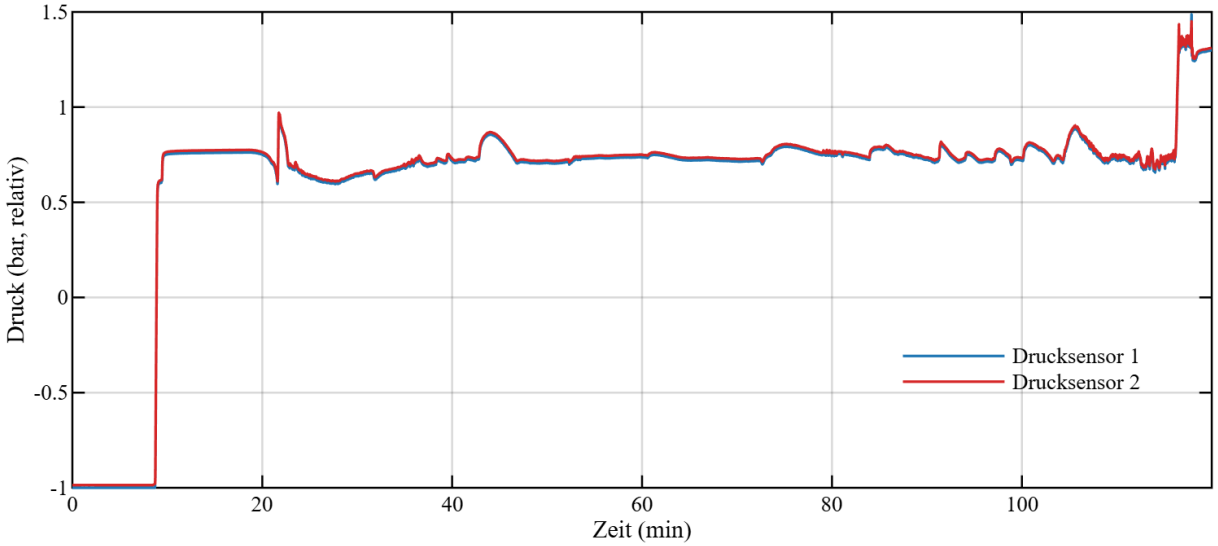
(b) Messung 29.04.26: Helium MFC — Flüssigvolumenfluss



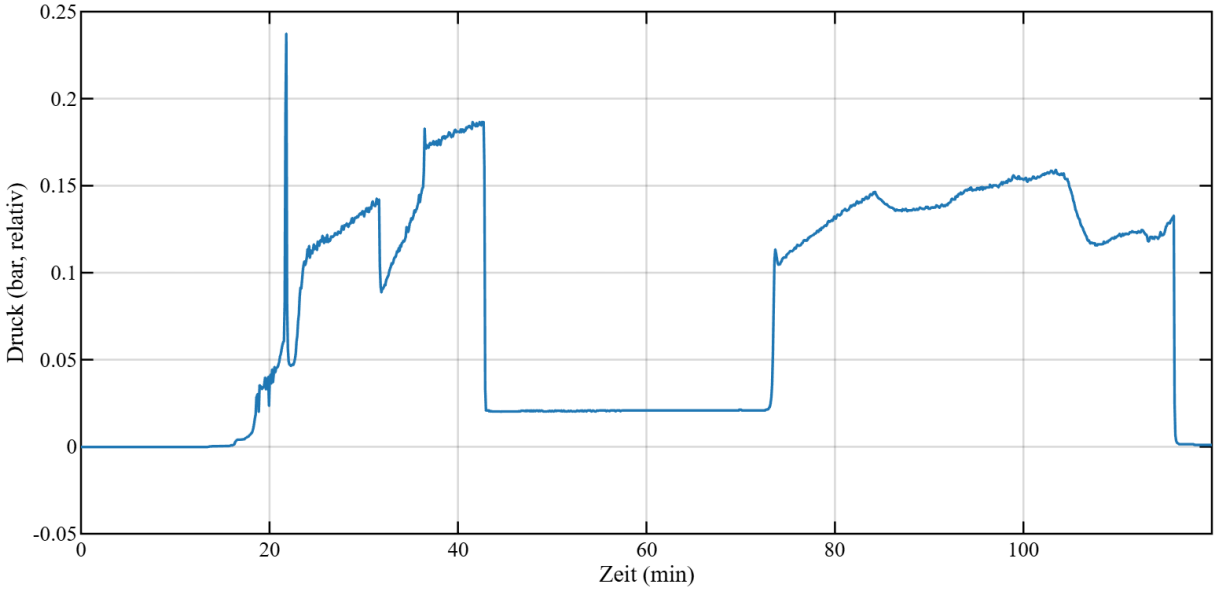
(c) Messung 29.04.26: Helium MFC — Sollwert



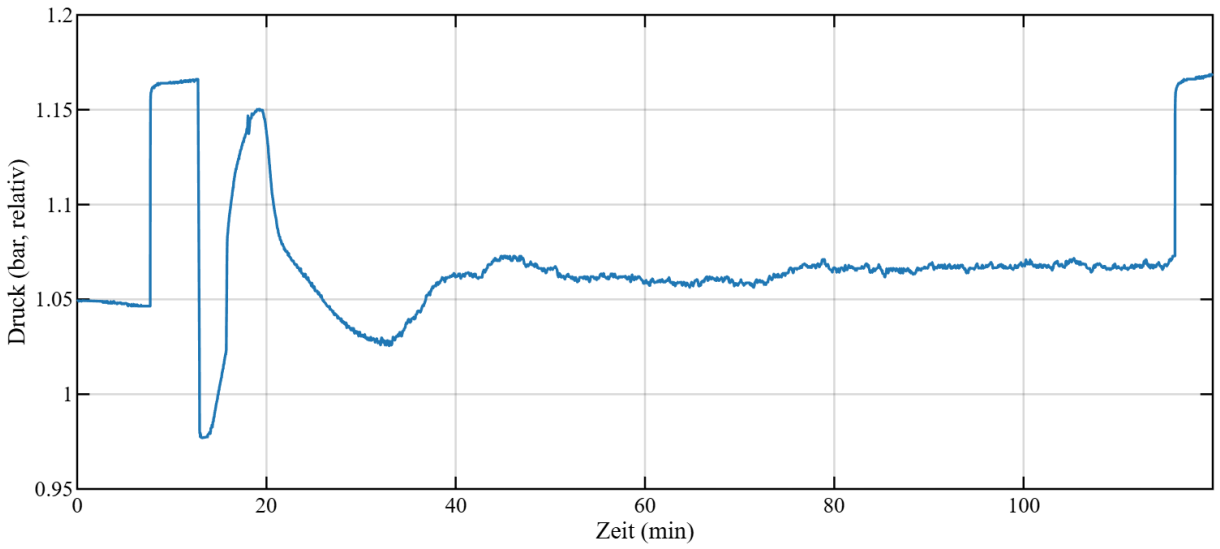
(a) Messung 29.04.26: Druckregler Helium



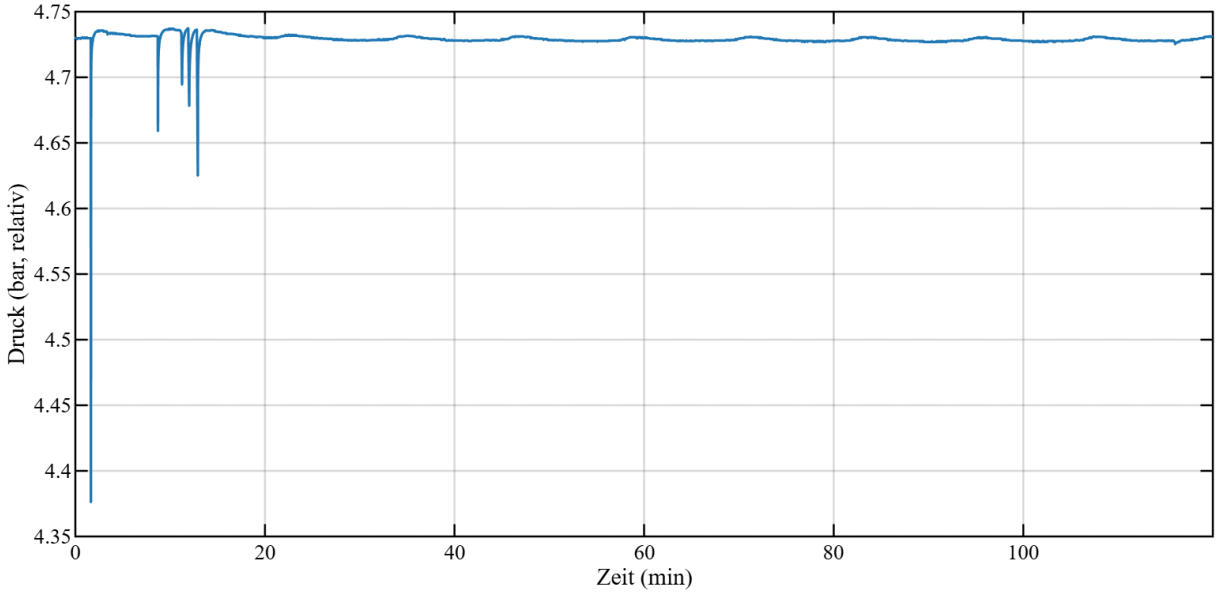
(b) Messung 29.04.26: Drucksensoren 1 und 2 (Moderatorgas Ein- und Ausgang)



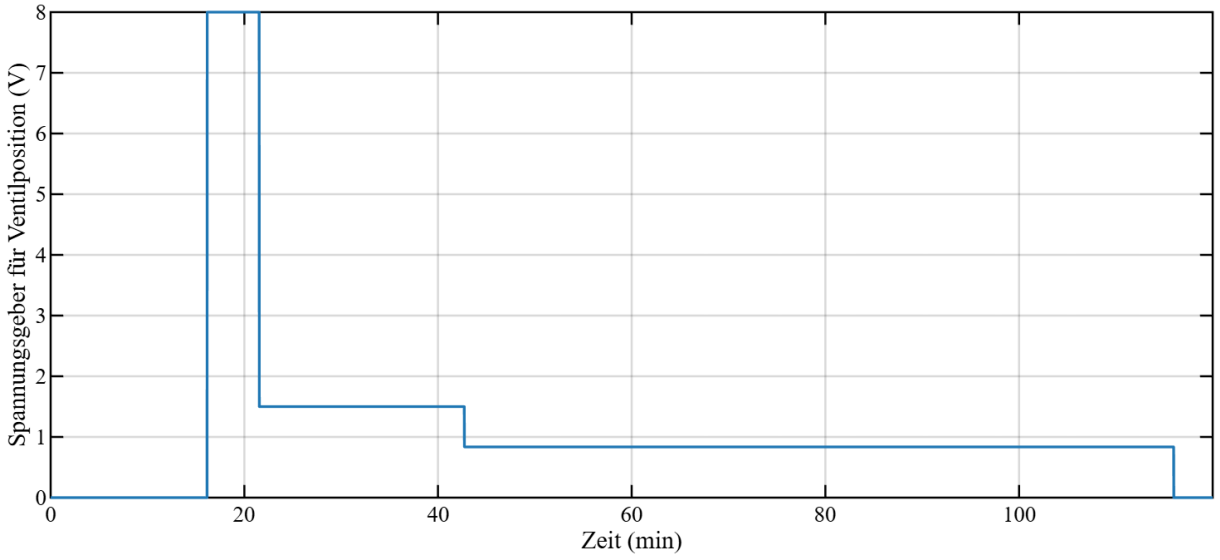
(c) Messung 29.04.26: Drucksensor 3 (Kühlgas Ausgang)



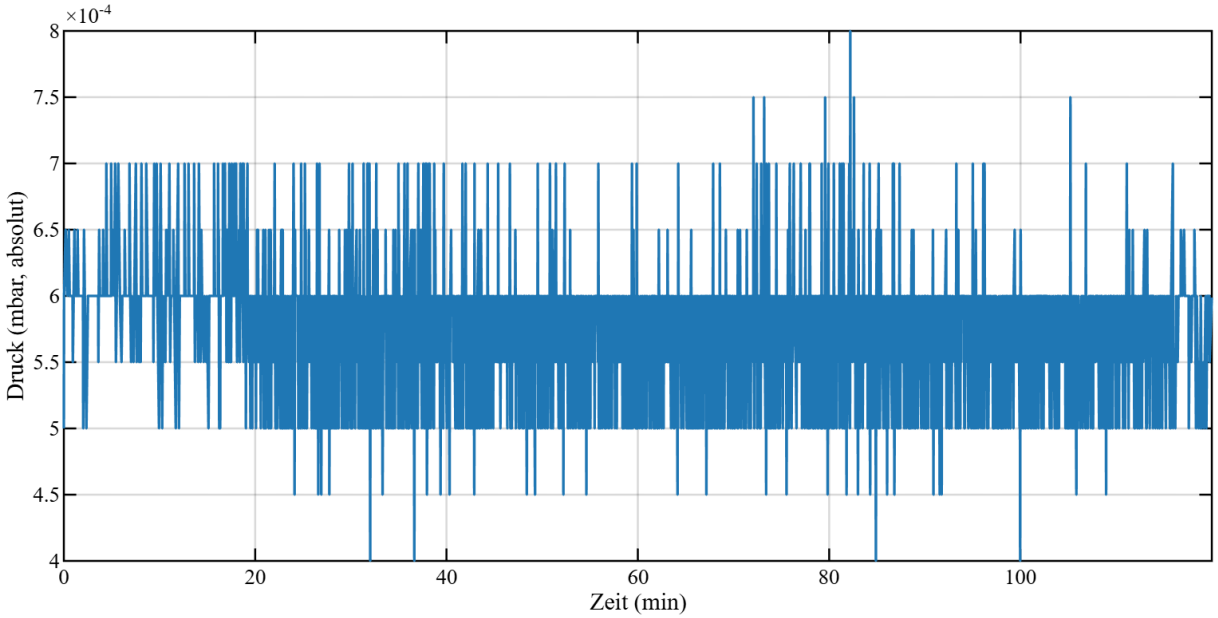
(a) Messung 29.04.26: Drucksensor 4 (Gasversorgung Kühlgas)



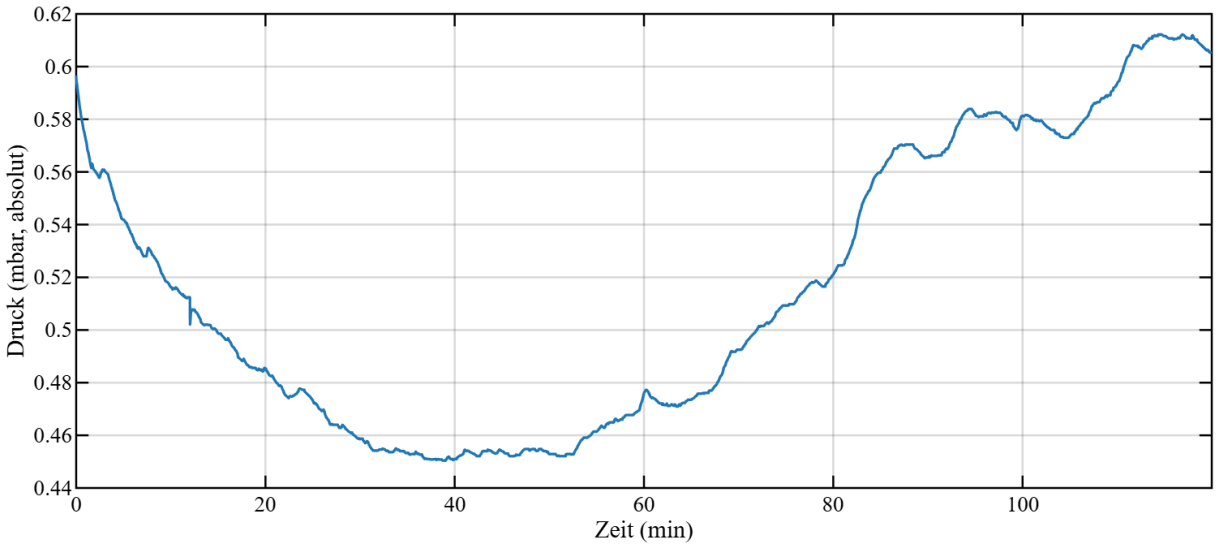
(b) Messung 29.04.26: Drucksensor Eingang (Druckluftversorgung)



(c) Messung 29.04.26: Spannungsgeber für den Transferheber



(a) Messung 29.04.26: Vakuummessröhre MPT200



(b) Messung 29.04.26: Vakuummessröhre PPT200

B Anhang 2: Quellcode der Simulation

Fluent Journal-Dateien

Materialdaten: Aluminium 5083-O

```
; ============================================================
; Fluent Journal File - NIST Materialdaten (piecewise-linear)
; Quelle: NIST Cryogenic Material Properties Database
;         (Mann, D., Ed., LNG Materials and Fluids, NBS, 1977)
;         https://www.nist.gov/mml/acmd/aluminum-5083-o-uns-a95083
; VERSION 3 - Korrekte Reihenfolge: Dichte > Cp > Lambda
;             x und y auf getrennten Zeilen
;             Density: erst Methode, dann Wert
;             Abschluss mit "yes" zum Speichern
; ============================================================
; ------------------------------------------------------------
; ALUMINIUM 5083-O (Moderatorbehaelter)
; Dichte 2660 kg/m^3 (typ. fuer Al 5083-O, ca. -1.5% ggue. 6061)
; ------------------------------------------------------------
/define/materials/change-create
aluminium
al-5083-nist
yes
constant
2660
yes
piecewise-linear
22
4.0
0.2920
6.0
0.6047
8.0
1.0479
10.0
1.5730
```

```
15.0
3.8536
20.0
8.8543
30.0
33.4455
40.0
81.9572
50.0
148.8382
60.0
223.6378
77.0
348.1279
100.0
492.1982
125.0
616.6285
150.0
713.0314
175.0
784.7830
200.0
835.2390
225.0
869.6063
250.0
895.0404
275.0
920.0093
300.0
953.8644
325.0
953.8644
350.0
953.8644
yes
piecewise-linear
22
4.0
3.2954
6.0
```

```
4.9822
8.0
6.6849
10.0
8.4267
15.0
12.8498
20.0
17.2123
30.0
25.4299
40.0
32.8886
50.0
39.6630
60.0
45.8543
77.0
55.2764
100.0
66.2641
125.0
76.4228
150.0
85.1225
175.0
92.6549
200.0
99.2426
225.0
105.0639
250.0
110.2654
275.0
114.9696
300.0
119.2805
325.0
119.2805
350.0
119.2805
yes
```

Listing B.1: Fluent Journal: Materialparameter Aluminium 5083-O (Al5083-O.jou)

Materialdaten: Methan (Feststoff)

```
;; Fluent Journal: Solid-Material "methane-solid"
;;
;; KORREKTUR ggue. Vorgaengerversion:
;; - Density bleibt KONSTANT (Fluent erlaubt fuer Solids keine
;;   piecewise-polynomial Density)
;;
;;
;; Properties:
;; ---- DENSITY [kg/m^3] ----       konstant 500
;;      (Mittelwert fester Phasen; im stationaeren Modell ohne
    Wirkung)
;;
;; ---- SPECIFIC HEAT [J/(kg K)] ----
;; Bereich 1:    5      -   10 K        linear      -192   +   50.4*T
;; Bereich 2:   10      -   21 K        linear      -948   + 126*T
;; Bereich 3:   21      -   90.694 K    linear      1269   +   20.5*T
;; Bereich 4:   90.694  - 111.51 K      konstant    3450
;; Bereich 5: 111.51    - 350 K         linear      2006   +    0.84*T
;;
;; ---- THERMAL CONDUCTIVITY [W/(m K)] ----
;; Bereich 1:    5      -   10 K        quadr.      0.7     + 0.16*T    -
    0.008*T^2
;; Bereich 2:   10      -   21 K        quadr.      2.973   - 0.1655*T +
    0.00182*T^2
;; Bereich 3:   21      -   90.694 K    quadr.      0.1     + 0.0182*T -
    0.000165*T^2
;; Bereich 4:   90.694  - 111.51 K      quadr.      0.2776  - 0.0003*T -
    0.000005*T^2
;; Bereich 5: 111.51    - 350 K         quadr.      0.0008 + 0.00009*T+
    0.0000008*T^2

/define/materials/copy solid aluminum
ch4
/define/materials/change-create aluminum methane-solid
yes
```

```
constant
500
yes
piecewise-polynomial
5
5
10
2
-192
50.4
10
21
2
-948
126
21
90.694
2
1269
20.5
90.694
111.51
1
3450
111.51
350
2
2006
0.84
yes
piecewise-polynomial
5
5
10
3
0.7
0.16
-0.008
10
21
3
2.973
```

```
-0.1655
0.00182
21
90.694
3
0.1
0.0182
-0.000165
90.694
111.51
3
0.2776
-0.0003
-0.000005
111.51
350
3
0.0008
0.00009
0.0000008
yes
```

Listing B.2: Fluent Journal: Materialparameter Methan als Feststoff (Methan.jou)

Materialdaten: Invar 36

```
; ============================================================
; Fluent Journal File - NIST Materialdaten (piecewise-linear)
; Quelle: NIST Cryogenic Material Properties Database
;         https://trc.nist.gov/cryogenics/materialproperties.htm
; Quelle Cp >27 K: Carpenter Invar 36 Datenblatt + Mann (LNG, 1977)
; Hinweis: NIST-Cp-Fit gilt nur 4-27 K, daher Stueckwerk-
   Interpolation
; VERSION 3 - Korrekte Reihenfolge: Dichte > Cp > Lambda
;             x und y auf getrennten Zeilen
;             Density: erst Methode, dann Wert
;             Abschluss mit "yes" zum Speichern
; ============================================================
/define/materials/change-create
steel
invar-fe36ni-nist
```

```
yes
constant
8050
yes
piecewise-linear
22
4.0
0.9749
6.0
1.4754
8.0
2.1786
10.0
3.1297
15.0
6.6734
20.0
12.3364
30.0
61.6676
40.0
200.0000
50.0
250.0000
60.0
290.0000
77.0
340.0000
100.0
390.0000
125.0
415.0000
150.0
440.0000
175.0
455.0000
200.0
470.0000
225.0
482.5000
250.0
495.0000
```

```
275.0
506.6279
300.0
517.0000
325.0
517.0000
350.0
517.0000
yes
piecewise-linear
22
4.0
0.2419
6.0
0.4001
8.0
0.5630
10.0
0.7339
15.0
1.1858
20.0
1.6521
30.0
2.5701
40.0
3.4370
50.0
4.2473
60.0
5.0053
77.0
6.1891
100.0
7.6114
125.0
8.9556
150.0
10.1113
175.0
11.0937
200.0
```

```
11.9151
225.0
12.5877
250.0
13.1237
275.0
13.5353
300.0
13.8349
325.0
13.8349
350.0
13.8349
yes
```

Listing B.3: Fluent Journal: Materialparameter Invar 36 / Fe36Ni (Invar.jou)

Materialimport-Journal (Übersicht)

```
; ============================================================
; Fluent Journal File - NIST Materialdaten (piecewise-linear)
; Quelle: Marquardt, Le, Radebaugh (2000), NIST Boulder CO
; VERSION 3 - Korrekte Reihenfolge: Dichte > Cp > Lambda
;             x und y auf getrennten Zeilen
;             Density: erst Methode, dann Wert
;             Abschluss mit "yes" zum Speichern
; ============================================================

; ------------------------------------------------------------
; ALUMINIUM 6061-T6
; ------------------------------------------------------------
/define/materials/change-create
aluminum
al-6061-nist
yes
constant
2700
yes
piecewise-linear
22
4.0
```

```
0.29
6.0
0.60
8.0
1.05
10.0
1.57
15.0
3.85
20.0
8.85
30.0
33.45
40.0
81.96
50.0
148.84
60.0
223.64
77.0
348.13
100.0
492.20
125.0
616.63
150.0
713.03
175.0
784.78
200.0
835.24
225.0
869.61
250.0
895.04
275.0
920.01
300.0
953.86
325.0
953.86
350.0
```

```
953.86
yes
piecewise-linear
22
4.0
5.3474
6.0
8.2679
8.0
11.2345
10.0
14.2043
15.0
21.4868
20.0
28.4275
30.0
41.0985
40.0
52.2330
50.0
62.0481
60.0
70.7595
77.0
83.5314
100.0
97.7012
125.0
110.1550
150.0
120.3629
175.0
128.8662
200.0
136.0252
225.0
142.0904
250.0
147.2427
275.0
151.6174
```

```
300.0
155.3188
325.0
155.3188
350.0
155.3188
yes

; ------------------------------------------------------------
; EDELSTAHL SS304
; ------------------------------------------------------------
/define/materials/change-create
steel
ss304-nist
yes
constant
7900
yes
piecewise-linear
22
4.0
2.07
6.0
2.86
8.0
4.09
10.0
5.28
15.0
8.59
20.0
13.45
30.0
30.54
40.0
58.69
50.0
95.69
60.0
136.92
77.0
204.49
```

```
100.0
275.50
125.0
326.64
150.0
362.09
175.0
390.74
200.0
416.43
225.0
439.43
250.0
457.92
275.0
468.96
300.0
469.45
325.0
469.45
350.0
469.45
yes
piecewise-linear
22
4.0
0.2724
6.0
0.4653
8.0
0.6770
10.0
0.9039
15.0
1.5182
20.0
2.1690
30.0
3.4686
40.0
4.6704
50.0
```

```
5.7301
60.0
6.6470
77.0
7.9211
100.0
9.2240
125.0
10.2950
150.0
11.1650
175.0
11.9270
200.0
12.6330
225.0
13.3120
250.0
13.9810
275.0
14.6460
300.0
15.3090
325.0
15.3090
350.0
15.3090
yes
```

Listing B.4: Fluent Journal: Materialimport Al 6061-T6 und Edelstahl SS304 (Fluent_Material_import.jou)

Fluent UDF-Dateien (C)

Temperaturabhängige Emissivität: Invar 36

```
/*
    ************************************************************************************

 * UDF: emissivity_invar36.c
```

```
 *
 * Temperaturabhaengige Emissivitaet fuer Invar 36 (nicht-MLI-umwickelt).
 * Verwendung als External Emissivity an Wall-BC mit Thermal Condition "Mixed"
 * und External Radiation Temperature = 293 K.
 *
 * Stuetzstellen aus Masterarbeit (Invar 36):
 *   T [K]:   20    50    77   100   150   200   250   300
 *   eps:  0.050 0.065 0.080 0.095 0.115 0.135 0.150 0.165
 *
 * Lineare Interpolation zwischen Stuetzstellen.
 * T < 20 K  -> eps(20)  = 0.050  (clamping)
 * T > 300 K -> eps(300) = 0.165  (clamping)
 *
 * Hook: Define -> User-Defined -> Function Hooks ->
 *       oder direkt im Wall-BC unter External Emissivity als UDF auswaehlen.
 ************************************************************************/

#include "udf.h"

/* Anzahl Stuetzstellen */
#define N_PTS 8

/* Stuetzstellen: Temperatur [K] und zugehoerige Emissivitaet [-] */
static const real T_table[N_PTS]   = { 20.0, 50.0, 77.0, 100.0,
                                       150.0, 200.0, 250.0, 300.0
                                     };
static const real eps_table[N_PTS] = { 0.050, 0.065, 0.080, 0.095,
                                       0.115, 0.135, 0.150, 0.165
                                     };

/*
   ------------------------------------------------------------------------

 * Hilfsfunktion: liefert eps(T) durch lineare Interpolation
 *------------------------------------------------------------------------*/
static real interp_emissivity(real T)
```

```
{
    int i;

    if (!(T > 0.0 && T < 1000.0))
        return eps_table[0];   /* sicherer Default bei Garbage */

    /* Clamping unterhalb des Tabellenbereichs */
    if (T <= T_table[0])
        return eps_table[0];

    /* Clamping oberhalb des Tabellenbereichs */
    if (T >= T_table[N_PTS - 1])
        return eps_table[N_PTS - 1];

    /* Lineare Interpolation im passenden Intervall */
    for (i = 0; i < N_PTS - 1; i++)
    {
        if (T >= T_table[i] && T <= T_table[i + 1])
        {
            real T1 = T_table[i];
            real T2 = T_table[i + 1];
            real e1 = eps_table[i];
            real e2 = eps_table[i + 1];
            return e1 + (e2 - e1) * (T - T1) / (T2 - T1);
        }
    }

    /* Fallback (sollte nie erreicht werden) */
    return eps_table[N_PTS - 1];
}

/*
   ------------------------------------------------------------------------

 * DEFINE_PROFILE: Emissivitaet als Funktion der Wandtemperatur
 *
 * Wird in der Wall-BC unter "External Emissivity" als UDF-Profil
 * ausgewaehlt.
 *------------------------------------------------------------------------
   */
DEFINE_PROFILE(emissivity_invar36, thread, position)
{
```

```
    face_t f;
    real T_wall;

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        /* Wandtemperatur an der Face */
        T_wall = F_T(f, thread);

        /* Emissivitaet setzen */
        F_PROFILE(f, thread, position) = interp_emissivity(T_wall);
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
```

Listing B.5: UDF: Temperaturabhängige Emissivität für Invar 36 (emmisivityinvar36.c)

Wärmefluss durch MLI (Lockheed-Gleichung)

```
/*
    ************************************************************************

 * UDF: heatflux_mli_lockheed.c
 *
 * Temperaturabhaengiger Waermefluss durch MLI nach Lockheed-
    Gleichung
 * (Keller et al., 1974) -- solid conduction + radiation term.
 * Gas-conduction-Term vernachlaessigt (Hochvakuum, p < 1e-4 Pa).
 *
 *   q" = (Cs * Nbar^2.63 / Ns) * (Th - Tc)
 *      + (Cr * eps / Ns) * sigma * (Th^4.67 - Tc^4.67)
 *
 *   [W/m^2], wenn Nbar in [Lagen/cm], T in [K], Ns dimensionslos.
 *
 * Anwendung: Heat-Flux-Profil an Wand-BC der MLI-umwickelten
    Rohrabschnitte.
 * Vorzeichen: q" > 0 bedeutet Waerme INs Rohr (Heizung der Wand).
 *
 * Hook: Wall-BC -> Thermal -> Heat Flux -> udf
    heatflux_mli_lockheed
 ************************************************************************
    */
```

```
18
19 #include "udf.h"
20
21 /* ---- MLI-Parameter (anpassen!)
      ---------------------------------------- */
22 #define N_LAYERS     10.0      /* Anzahl Lagen Ns
                                    */
23 #define N_BAR        10.0      /* Lagendichte [Lagen/cm]
                                  */
24 #define EPS_MLI      0.04      /* Emissivitaet Alu-bedampftes Mylar
                                  */
25 #define T_HOT        293.0     /* Aussentemperatur (Vakuumkammer) [K]
                                  */
26
27 /* ---- Lockheed-Konstanten (Keller et al., 1974)
      ------------------------- */
28 #define C_S          8.95e-8   /* solid conduction constant
                                  */
29 #define C_R          5.39e-10  /* radiation constant
                                 */
30 #define EXP_N        2.63      /* Exponent von Nbar
                                   */
31 #define EXP_T        4.67      /* Exponent der Temperatur im
      Strahlungsterm  */
32
33 #define SIGMA_SB     5.67e-8   /* Stefan-Boltzmann [W/(m^2 K^4)]
                                 */
34
35 /*
      ------------------------------------------------------------------------

36  * Hilfsfunktion: Lockheed-Waermefluss in W/m^2
37  *------------------------------------------------------------------------
       */
38 static real lockheed_qflux(real Tc)
39 {
40     real q_solid, q_rad;
41
42     /* Schutz gegen NaN, negative oder unphysikalische Werte */
43     if (!(Tc > 0.0 && Tc < 1000.0))
44         return 0.0;
45     if (Tc >= T_HOT)
```

```
46          return 0.0;
47
48      /* Solid-Conduction-Term */
49      q_solid = (C_S * pow(N_BAR, EXP_N) / N_LAYERS) * (T_HOT - Tc);
50
51      /* Radiation-Term */
52      q_rad = (C_R * EPS_MLI / N_LAYERS)
53              * (pow(T_HOT, EXP_T) - pow(Tc, EXP_T));
54
55      return q_solid + q_rad;
56  }
57
58  /*
        ------------------------------------------------------------------------
59   * DEFINE_PROFILE: Heat Flux als Funktion der Wandtemperatur
60   *
61   * In Wall-BC -> Thermal Conditions: "Heat Flux"
62   * Heat Flux: udf heatflux_mli_lockheed
63   *-------------------------------------------------------------------------
        */
64  DEFINE_PROFILE(heatflux_mli_lockheed, thread, position)
65  {
66      face_t f;
67      real T_wall;
68
69      begin_f_loop(f, thread)
70      {
71          T_wall = F_T(f, thread);
72          F_PROFILE(f, thread, position) = lockheed_qflux(T_wall);
73      }
74      end_f_loop(f, thread)
75  }
```

Listing B.6: UDF: Temperaturabhängiger Wärmefluss durch MLI nach Lockheed-Gleichung (HeatflusMLILockheed.c)

Wärmefluss durch Vespel-SP-1-Spacer V1

```
1   /*
        ************************************************************************
```

```
/*
 * UDF: heatflux_vespel_spacers.c
 *
 * Waermefluss durch Vespel-SP-1-Spacer als Heat-Flux-BC auf den
 * ausgeschnittenen Rohrkontakt-Zonen.
 *
 * Modell: 1D-Waermeleitung durch effektiven Engstellenquerschnitt.
 *
 *   Q_spacer = (A_eff / L_eff) * integral_{T_wall}^{T_hot} k(T) dT
 *   q"_face  = Q_spacer / A_kontakt
 *
 * Materialdaten: Vespel SP-1, Waermeleitfaehigkeit aus skalierter
 * NIST-Polyimid-Korrelation (Faktor 1.80, Anpassung an DuPont-
 * Datenblattwert bei 313 K).
 *
 * Geometrien (Kontaktflaechen aus Bogenlange x axialer Spacer-Dicke
 * 5 mm, basierend auf 6 mm projizierter Sehnenbreite):
 *
 *   1) Moderatorspacer Kuehlgas (Rohr O 6 mm, 180 Grad Bogen):
 *      A/L = 2.50e-3 m,  A_kontakt = 47.12 mm^2
 *   2) Moderatorspacer Moderatorgas (Rohr O 6 mm, 180 Grad Bogen):
 *      A/L = 7.81e-3 m,  A_kontakt = 47.12 mm^2
 *   3) Helium-Spacer (Rohr O 8 mm, 97.2 Grad Bogen):
 *      A/L = 1.00e-3 m,  A_kontakt = 33.92 mm^2
 *   4) Helium-Einlass-Spacer (Rohr O 12 mm, 60 Grad Bogen):
 *      A/L = 4.58e-3 m,  A_kontakt = 31.42 mm^2
 *
 * Hook in Fluent:
 *   Define -> User-Defined -> Functions -> Compiled -> Build -> Load
 *   Boundary Conditions -> [Spacer-Kontaktzone] -> Thermal
 *     Thermal Condition: Heat Flux
 *     Heat Flux: udf [passende Funktion]
 ******************************************************************************/

#include "udf.h"

#define T_HOT 293.0

```

```
/* ---- Geometrie-Parameter pro Spacer-Typ
   ------------------------------- */
#define A_OVER_L_MOD_KUEHL       2.50e-3
#define A_KONT_MOD_KUEHL         47.12e-6

#define A_OVER_L_MOD_MODERATOR   7.81e-3
#define A_KONT_MOD_MODERATOR     47.12e-6

#define A_OVER_L_HELIUM          1.00e-3
#define A_KONT_HELIUM            33.92e-6

#define A_OVER_L_HE_EINLASS      4.58e-3
#define A_KONT_HE_EINLASS        31.42e-6

/* ---- Vortabelliertes Integral I(Tc) = integral_{Tc}^{293}
   k_Vespel dT
 * Berechnet aus skaliertem NIST-Polyimid-Polynom (Faktor 1.80).
 * Uebereinstimmung mit Tieftemperaturmessungen (Runyan & Jones
    2008,
 * Woodcraft & Gray 2009) auf ca. 15%.
 */
#define N_PTS 14
static const real Tc_table[N_PTS] = {
      4.0,   10.0,   20.0,   30.0,   50.0,   77.0, 100.0,
    130.0, 160.0, 190.0, 220.0, 250.0, 270.0, 290.0
};
static const real I_table[N_PTS] = {
    75.744, 75.572, 74.919, 73.878, 70.890, 65.421, 59.852,
    51.754, 43.019, 33.843, 24.327, 14.522,  7.836,  1.031
};

/*
   ------------------------------------------------------------------------

 * Hilfsfunktion: lineare Interpolation des Integrals I(Tc)
 *-------------------------------------------------------------------------
    */
static real integral_k_dT(real Tc)
{
    int i;

    if (Tc <= Tc_table[0])         return I_table[0];
```

```
    if (Tc >= Tc_table[N_PTS - 1]) return I_table[N_PTS - 1];

    for (i = 0; i < N_PTS - 1; i++)
    {
        if (Tc >= Tc_table[i] && Tc <= Tc_table[i + 1])
        {
            real T1 = Tc_table[i];
            real T2 = Tc_table[i + 1];
            real I1 = I_table[i];
            real I2 = I_table[i + 1];
            return I1 + (I2 - I1) * (Tc - T1) / (T2 - T1);
        }
    }
    return I_table[N_PTS - 1];
}

/*
    ------------------------------------------------------------------------

 * Generische Hilfsfunktion: Heat Flux fuer gegebene Spacer-Geometrie
 *------------------------------------------------------------------------
    */
static real spacer_heatflux(real T_wall, real A_over_L, real A_kont)
{
    real Q;
    if (!(T_wall > 0.0 && T_wall < 1000.0))
        return 0.0;

    Q = A_over_L * integral_k_dT(T_wall);
    return Q / A_kont;
}

/* ===== Spacer 1: Moderatorspacer - Kuehlgasleitung ==================== */
DEFINE_PROFILE(heatflux_mod_kuehlgas, thread, position)
{
    face_t f;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        real T_wall = F_T(f, thread);
```

```
111         F_PROFILE(f, thread, position) =
112             spacer_heatflux(T_wall, A_OVER_L_MOD_KUEHL,
113                             A_KONT_MOD_KUEHL);
114     }
115     end_f_loop(f, thread)
116 }
117
118 /* ===== Spacer 2: Moderatorspacer - Moderatorgasleitung
    ================ */
119 DEFINE_PROFILE(heatflux_mod_moderatorgas, thread, position)
120 {
121     face_t f;
122     begin_f_loop(f, thread)
123     {
124         real T_wall = F_T(f, thread);
125         F_PROFILE(f, thread, position) =
126             spacer_heatflux(T_wall, A_OVER_L_MOD_MODERATOR,
127                             A_KONT_MOD_MODERATOR);
128     }
129     end_f_loop(f, thread)
130 }
131
132 /* ===== Spacer 3: Helium-Spacer
    ======================================== */
133 DEFINE_PROFILE(heatflux_helium, thread, position)
134 {
135     face_t f;
136     begin_f_loop(f, thread)
137     {
138         real T_wall = F_T(f, thread);
139         F_PROFILE(f, thread, position) =
140             spacer_heatflux(T_wall, A_OVER_L_HELIUM,
141                             A_KONT_HELIUM);
142     }
143     end_f_loop(f, thread)
144 }
145
146 /* ===== Spacer 4: Helium-Einlass-Spacer
    ================================ */
147 DEFINE_PROFILE(heatflux_helium_einlass, thread, position)
148 {
149     face_t f;
```

```
150     begin_f_loop(f, thread)
151     {
152         real T_wall = F_T(f, thread);
153         F_PROFILE(f, thread, position) =
154             spacer_heatflux(T_wall, A_OVER_L_HE_EINLASS,
155                             A_KONT_HE_EINLASS);
156     }
157     end_f_loop(f, thread)
158 }
```

Listing B.7: UDF: Wärmefluss durch Vespel-SP-1-Spacer als Heat-Flux-BC (Vespelsp1.c)

Wärmefluss durch Moderatorkopf-Spacer (kombiniert, V2)

```
1  /*
       ************************************************************************
2   * UDF: heatflux_moderatorkopf_spacer.c
3   *
4   * Kombinierte Heat-Flux-UDF fuer die beiden Moderatorkopf-Spacer (
       vorne+hinten).
5   * Pro Rohr und Spacer werden Hauptpfad (Gehaeuse 293K -> Rohr) UND
        Steg-Beitraege
6   * zu den Nachbarrohren in EINEM Heat-Flux-Wert summiert.
7   *
8   * Topologie pro Spacer (4 Rohre, paarweise: He oben, CH4 unten):
9   *       He-in ----6mm----- He-out
10  *         |   \           /     |
11  *       2x2mm   (keine Diag) 2x2mm
12  *         |    /           \     |
13  *       CH4-in ---6mm---- CH4-out
14  *
15  * Steg-Kopplung NUR innerhalb desselben Spacers -- die beiden
       Spacer sind
16  * thermisch unabhaengig.
17  *
18  * Diagnose: Schreibt jede N. Iteration die aktuellen
       Mitteltemperaturen
19  * und Steg-Waermestroeome in moderkopf_diagnose.csv im Working
       Directory.
```

```
20  *
21  * Hook in Fluent:
22  *   Define -> User-Defined -> Function Hooks -> Adjust ->
        adjust_moderkopf_T
23  *   Boundary Conditions -> 8 Rohr-Zonen -> Heat Flux -> jeweilige
        UDF
24  ************************************************************************
        */
25
26  #include "udf.h"
27  #include <math.h>
28
29  /*
        ========================================================================
30  * THREAD-IDs ANPASSEN
31  *
        ========================================================================
         */
32  #define ID_S1_HEIN    227
33  #define ID_S1_HEOUT   226
34  #define ID_S1_CH4IN   228
35  #define ID_S1_CH4OUT   25
36
37  #define ID_S2_HEIN     27
38  #define ID_S2_HEOUT    26
39  #define ID_S2_CH4IN    17
40  #define ID_S2_CH4OUT  229
41
42  /*
        ========================================================================
43  * Geometrie
44  *
        ========================================================================
         */
45  #define AOL_HAUPT_HE    2.50e-3
46  #define AOL_HAUPT_CH4   3.75e-3
47  #define AOL_STEG_2x2    1.25e-3
48  #define AOL_STEG_1x6    1.88e-3
49
50  #define A_KONT_HE      33.92e-6
```

```
51 #define A_KONT_CH4      47.12e-6
52
53 #define DIAGNOSE_INTERVAL 50
54
55 /*
      ============================================================================

56  * Globale Mitteltemperaturen
57  *
      ============================================================================
       */
58 static real T_s1_hein   =  10.0, T_s1_heout  =  20.0;
59 static real T_s1_ch4in  = 100.0, T_s1_ch4out = 100.0;
60 static real T_s2_hein   =  10.0, T_s2_heout  =  20.0;
61 static real T_s2_ch4in  = 100.0, T_s2_ch4out = 100.0;
62
63 static int adjust_counter = 0;
64
65 /*
      ============================================================================

66  * Vespel-Integral I(Tc) = int_{Tc}^{293} k(T) dT   [W/m]
67  *
      ============================================================================
       */
68 #define N_PTS 14
69 static const real Tc_table[N_PTS] = {
70       4.0,  10.0,  20.0,  30.0,  50.0,  77.0, 100.0,
71     130.0, 160.0, 190.0, 220.0, 250.0, 270.0, 290.0
72 };
73 static const real I_table[N_PTS] = {
74     75.744, 75.572, 74.919, 73.878, 70.890, 65.421, 59.852,
75     51.754, 43.019, 33.843, 24.327, 14.522,  7.836,  1.031
76 };
77
78 static real interp_I(real T)
79 {
80     int i;
81     if (T <= Tc_table[0])          return I_table[0];
82     if (T >= Tc_table[N_PTS - 1]) return I_table[N_PTS - 1];
83     for (i = 0; i < N_PTS - 1; i++)
84     {
```

```
85          if (T >= Tc_table[i] && T <= Tc_table[i + 1])
86              return I_table[i] + (I_table[i+1] - I_table[i]) *
87                     (T - Tc_table[i]) / (Tc_table[i+1] - Tc_table[i
                          ]);
88      }
89      return I_table[N_PTS - 1];
90  }
91
92  static real integral_k_signed(real T1, real T2)
93  {
94      return interp_I(T1) - interp_I(T2);
95  }
96
97  static real Q_haupt(real T_rohr, real AoL)
98  {
99      if (AoL <= 0.0) return 0.0;
100     return AoL * integral_k_signed(T_rohr, 293.0);
101 }
102
103 static real Q_steg(real T_self, real T_nachbar, real AoL)
104 {
105     if (AoL <= 0.0) return 0.0;
106     return AoL * integral_k_signed(T_self, T_nachbar);
107 }
108
109 /* Sicherer Heat-Flux: NaN/Inf Schutz */
110 static real safe_flux(real Q_total, real A_kont)
111 {
112     real q;
113     if (A_kont <= 0.0) return 0.0;
114     q = Q_total / A_kont;
115     if (q != q || q > 1.0e9 || q < -1.0e9) return 0.0;
116     return q;
117 }
118
119 /*
    ================================================================================

120  * Flaechengewichtete Wandtemperatur -- Node-seitig mit PRF_GRSUM1
121  * Gibt -1.0 zurueck wenn Zone nicht gefunden oder nicht
       initialisiert
```

```
122  *
     ==========================================================================
      */
123 static real avg_wall_T_node(Domain *domain, int thread_id)
124 {
125     real sum_T = 0.0, sum_A = 0.0;
126     Thread *t = Lookup_Thread(domain, thread_id);
127     face_t f;
128     real A_vec[ND_ND], A_mag, T_face;
129
130     if (t == NULL)
131     {
132         Message("Warnung: Thread-ID %d nicht gefunden!\n",
               thread_id);
133         return -1.0;
134     }
135
136     begin_f_loop(f, t)
137     {
138         T_face = F_T(f, t);
139         /* Nur physikalisch sinnvolle Temperaturen: 3K bis 295K */
140         if (T_face > 3.0 && T_face < 295.0)
141         {
142             F_AREA(A_vec, f, t);
143             A_mag = NV_MAG(A_vec);
144             sum_T += T_face * A_mag;
145             sum_A += A_mag;
146         }
147     }
148     end_f_loop(f, t)
149
150     sum_T = PRF_GRSUM1(sum_T);
151     sum_A = PRF_GRSUM1(sum_A);
152
153     if (sum_A <= 0.0) return -1.0;
154     return sum_T / sum_A;
155 }
156
157 /* Unterrelaxation und Clamp als Inline-Funktion */
158 static real update_with_relax(real T_new, real T_old)
159 {
160     real T_clamped;
```

```
    /* Clamp: 3K bis 295K */
    if (T_new < 3.0)        T_clamped = 3.0;
    else if (T_new > 295.0) T_clamped = 295.0;
    else                    T_clamped = T_new;
    /* Unterrelaxation: 30% neu, 70% alt */
    return 0.3 * T_clamped + 0.7 * T_old;
}

/*
    ============================================================================

 * DEFINE_ADJUST
 *
    ============================================================================
     */
DEFINE_ADJUST(adjust_moderkopf_T, domain)
{
    real T;
    adjust_counter++;

    /* Ersten Aufruf ueberspringen -- Felder noch nicht
       initialisiert */
    if (adjust_counter < 2) return;

    T = avg_wall_T_node(domain, ID_S1_HEIN);
    if (T > 0.0) T_s1_hein   = update_with_relax(T, T_s1_hein);

    T = avg_wall_T_node(domain, ID_S1_HEOUT);
    if (T > 0.0) T_s1_heout  = update_with_relax(T, T_s1_heout);

    T = avg_wall_T_node(domain, ID_S1_CH4IN);
    if (T > 0.0) T_s1_ch4in  = update_with_relax(T, T_s1_ch4in);

    T = avg_wall_T_node(domain, ID_S1_CH4OUT);
    if (T > 0.0) T_s1_ch4out = update_with_relax(T, T_s1_ch4out);

    T = avg_wall_T_node(domain, ID_S2_HEIN);
    if (T > 0.0) T_s2_hein   = update_with_relax(T, T_s2_hein);

    T = avg_wall_T_node(domain, ID_S2_HEOUT);
    if (T > 0.0) T_s2_heout  = update_with_relax(T, T_s2_heout);

```

```
198     T = avg_wall_T_node(domain, ID_S2_CH4IN);
199     if (T > 0.0) T_s2_ch4in  = update_with_relax(T, T_s2_ch4in);
200
201     T = avg_wall_T_node(domain, ID_S2_CH4OUT);
202     if (T > 0.0) T_s2_ch4out = update_with_relax(T, T_s2_ch4out);
203
204     /* CSV und Console nur auf Node 0 */
205     if (I_AM_NODE_ZERO_P &&
206         (adjust_counter % DIAGNOSE_INTERVAL == 0 || adjust_counter
               == 2))
207     {
208         FILE *fp;
209         static int header_written = 0;
210
211         if (!header_written)
212         {
213             fp = fopen("moderkopf_diagnose.csv", "w");
214             if (fp != NULL)
215             {
216                 fprintf(fp,
217                     "Iter,"
218                     "T_S1_Hein,T_S1_Heout,T_S1_CH4in,T_S1_CH4out,"
219                     "T_S2_Hein,T_S2_Heout,T_S2_CH4in,T_S2_CH4out,"
220                     "Q_S1_Hein_CH4in_mW,Q_S1_Hein_Heout_mW,"
221                     "Q_S1_Heout_CH4out_mW,Q_S1_CH4in_CH4out_mW,"
222                     "Q_S2_Hein_CH4in_mW,Q_S2_Hein_Heout_mW,"
223                     "Q_S2_Heout_CH4out_mW,Q_S2_CH4in_CH4out_mW,"
224                     "Q_S1_Haupt_Hein_mW,Q_S1_Haupt_CH4in_mW,"
225                     "Q_S2_Haupt_Hein_mW,Q_S2_Haupt_CH4in_mW\n");
226                 fclose(fp);
227                 header_written = 1;
228             }
229         }
230
231         fp = fopen("moderkopf_diagnose.csv", "a");
232         if (fp != NULL)
233         {
234             fprintf(fp,
235                 "%d,"
236                 "%.3f,%.3f,%.3f,%.3f,"
237                 "%.3f,%.3f,%.3f,%.3f,"
238                 "%.4f,%.4f,%.4f,%.4f,"
```

```
239                 "%.4f,%.4f,%.4f,%.4f,"
240                 "%.4f,%.4f,%.4f,%.4f\n",
241                 adjust_counter,
242                 T_s1_hein, T_s1_heout, T_s1_ch4in, T_s1_ch4out,
243                 T_s2_hein, T_s2_heout, T_s2_ch4in, T_s2_ch4out,
244                 1000.0*Q_steg(T_s1_hein,  T_s1_ch4in,  AOL_STEG_2x2
                        ),
245                 1000.0*Q_steg(T_s1_hein,  T_s1_heout,  AOL_STEG_1x6
                        ),
246                 1000.0*Q_steg(T_s1_heout, T_s1_ch4out, AOL_STEG_2x2
                        ),
247                 1000.0*Q_steg(T_s1_ch4in, T_s1_ch4out, AOL_STEG_1x6
                        ),
248                 1000.0*Q_steg(T_s2_hein,  T_s2_ch4in,  AOL_STEG_2x2
                        ),
249                 1000.0*Q_steg(T_s2_hein,  T_s2_heout,  AOL_STEG_1x6
                        ),
250                 1000.0*Q_steg(T_s2_heout, T_s2_ch4out, AOL_STEG_2x2
                        ),
251                 1000.0*Q_steg(T_s2_ch4in, T_s2_ch4out, AOL_STEG_1x6
                        ),
252                 1000.0*Q_haupt(T_s1_hein,  AOL_HAUPT_HE),
253                 1000.0*Q_haupt(T_s1_ch4in, AOL_HAUPT_CH4),
254                 1000.0*Q_haupt(T_s2_hein,  AOL_HAUPT_HE),
255                 1000.0*Q_haupt(T_s2_ch4in, AOL_HAUPT_CH4));
256             fclose(fp);
257         }
258
259         Message("\n---␣Moderkopf␣Iter␣%d␣---\n", adjust_counter);
260         Message("S1:␣He-in=%6.2fK␣He-out=%6.2fK␣CH4-in=%6.2fK␣"
261                 "CH4-out=%6.2fK\n",
262                 T_s1_hein, T_s1_heout, T_s1_ch4in, T_s1_ch4out);
263         Message("S2:␣He-in=%6.2fK␣He-out=%6.2fK␣CH4-in=%6.2fK␣"
264                 "CH4-out=%6.2fK\n",
265                 T_s2_hein, T_s2_heout, T_s2_ch4in, T_s2_ch4out);
266         Message("Q_S1:␣Hein->CH4in=%.1fmW␣Hein->Heout=%.1fmW␣"
267                 "Haupt_Hein=%.1fmW\n",
268                 1000.0*Q_steg(T_s1_hein, T_s1_ch4in, AOL_STEG_2x2),
269                 1000.0*Q_steg(T_s1_hein, T_s1_heout, AOL_STEG_1x6),
270                 1000.0*Q_haupt(T_s1_hein, AOL_HAUPT_HE));
271     }
272 }
```

```
273
274 /*
    ==========================================================================

275  * DEFINE_PROFILE -- Spacer 1
276  *
    ==========================================================================
     */
277 DEFINE_PROFILE(qspacer_s1_hein, thread, position)
278 {
279     face_t f;
280     real Q = Q_haupt(T_s1_hein, AOL_HAUPT_HE)
281            + Q_steg(T_s1_hein, T_s1_ch4in, AOL_STEG_2x2)
282            + Q_steg(T_s1_hein, T_s1_heout, AOL_STEG_1x6);
283     real q = safe_flux(Q, A_KONT_HE);
284     begin_f_loop(f, thread)
285         F_PROFILE(f, thread, position) = q;
286     end_f_loop(f, thread)
287 }
288
289 DEFINE_PROFILE(qspacer_s1_heout, thread, position)
290 {
291     face_t f;
292     real Q = Q_haupt(T_s1_heout, AOL_HAUPT_HE)
293            + Q_steg(T_s1_heout, T_s1_ch4out, AOL_STEG_2x2)
294            + Q_steg(T_s1_heout, T_s1_hein,   AOL_STEG_1x6);
295     real q = safe_flux(Q, A_KONT_HE);
296     begin_f_loop(f, thread)
297         F_PROFILE(f, thread, position) = q;
298     end_f_loop(f, thread)
299 }
300
301 DEFINE_PROFILE(qspacer_s1_ch4in, thread, position)
302 {
303     face_t f;
304     real Q = Q_haupt(T_s1_ch4in, AOL_HAUPT_CH4)
305            + Q_steg(T_s1_ch4in, T_s1_hein,   AOL_STEG_2x2)
306            + Q_steg(T_s1_ch4in, T_s1_ch4out, AOL_STEG_1x6);
307     real q = safe_flux(Q, A_KONT_CH4);
308     begin_f_loop(f, thread)
309         F_PROFILE(f, thread, position) = q;
310     end_f_loop(f, thread)
```

```
311 }
312
313 DEFINE_PROFILE(qspacer_s1_ch4out, thread, position)
314 {
315     face_t f;
316     real Q = Q_haupt(T_s1_ch4out, AOL_HAUPT_CH4)
317            + Q_steg(T_s1_ch4out, T_s1_heout, AOL_STEG_2x2)
318            + Q_steg(T_s1_ch4out, T_s1_ch4in, AOL_STEG_1x6);
319     real q = safe_flux(Q, A_KONT_CH4);
320     begin_f_loop(f, thread)
321         F_PROFILE(f, thread, position) = q;
322     end_f_loop(f, thread)
323 }
324
325 /*
    ============================================================================

326  * DEFINE_PROFILE -- Spacer 2
327  *
     ============================================================================
      */
328 DEFINE_PROFILE(qspacer_s2_hein, thread, position)
329 {
330     face_t f;
331     real Q = Q_haupt(T_s2_hein, AOL_HAUPT_HE)
332            + Q_steg(T_s2_hein, T_s2_ch4in, AOL_STEG_2x2)
333            + Q_steg(T_s2_hein, T_s2_heout, AOL_STEG_1x6);
334     real q = safe_flux(Q, A_KONT_HE);
335     begin_f_loop(f, thread)
336         F_PROFILE(f, thread, position) = q;
337     end_f_loop(f, thread)
338 }
339
340 DEFINE_PROFILE(qspacer_s2_heout, thread, position)
341 {
342     face_t f;
343     real Q = Q_haupt(T_s2_heout, AOL_HAUPT_HE)
344            + Q_steg(T_s2_heout, T_s2_ch4out, AOL_STEG_2x2)
345            + Q_steg(T_s2_heout, T_s2_hein,   AOL_STEG_1x6);
346     real q = safe_flux(Q, A_KONT_HE);
347     begin_f_loop(f, thread)
348         F_PROFILE(f, thread, position) = q;
```

```
349     end_f_loop(f, thread)
350 }
351
352 DEFINE_PROFILE(qspacer_s2_ch4in, thread, position)
353 {
354     face_t f;
355     real Q = Q_haupt(T_s2_ch4in, AOL_HAUPT_CH4)
356            + Q_steg(T_s2_ch4in, T_s2_hein,   AOL_STEG_2x2)
357            + Q_steg(T_s2_ch4in, T_s2_ch4out, AOL_STEG_1x6);
358     real q = safe_flux(Q, A_KONT_CH4);
359     begin_f_loop(f, thread)
360         F_PROFILE(f, thread, position) = q;
361     end_f_loop(f, thread)
362 }
363
364 DEFINE_PROFILE(qspacer_s2_ch4out, thread, position)
365 {
366     face_t f;
367     real Q = Q_haupt(T_s2_ch4out, AOL_HAUPT_CH4)
368            + Q_steg(T_s2_ch4out, T_s2_heout, AOL_STEG_2x2)
369            + Q_steg(T_s2_ch4out, T_s2_ch4in, AOL_STEG_1x6);
370     real q = safe_flux(Q, A_KONT_CH4);
371     begin_f_loop(f, thread)
372         F_PROFILE(f, thread, position) = q;
373     end_f_loop(f, thread)
374 }
```

Listing B.8: UDF: Kombinierter Wärmefluss durch Moderatorkopf-Spacer – Hauptpfad und Steg-Kopplung (heatflux_moderatorkopf_spacer.c)