

# Systematische Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten des KATRIN Tritiumloop

Diplomarbeit

von

Florian Priester

bei Prof. Dr. G. Drexlin

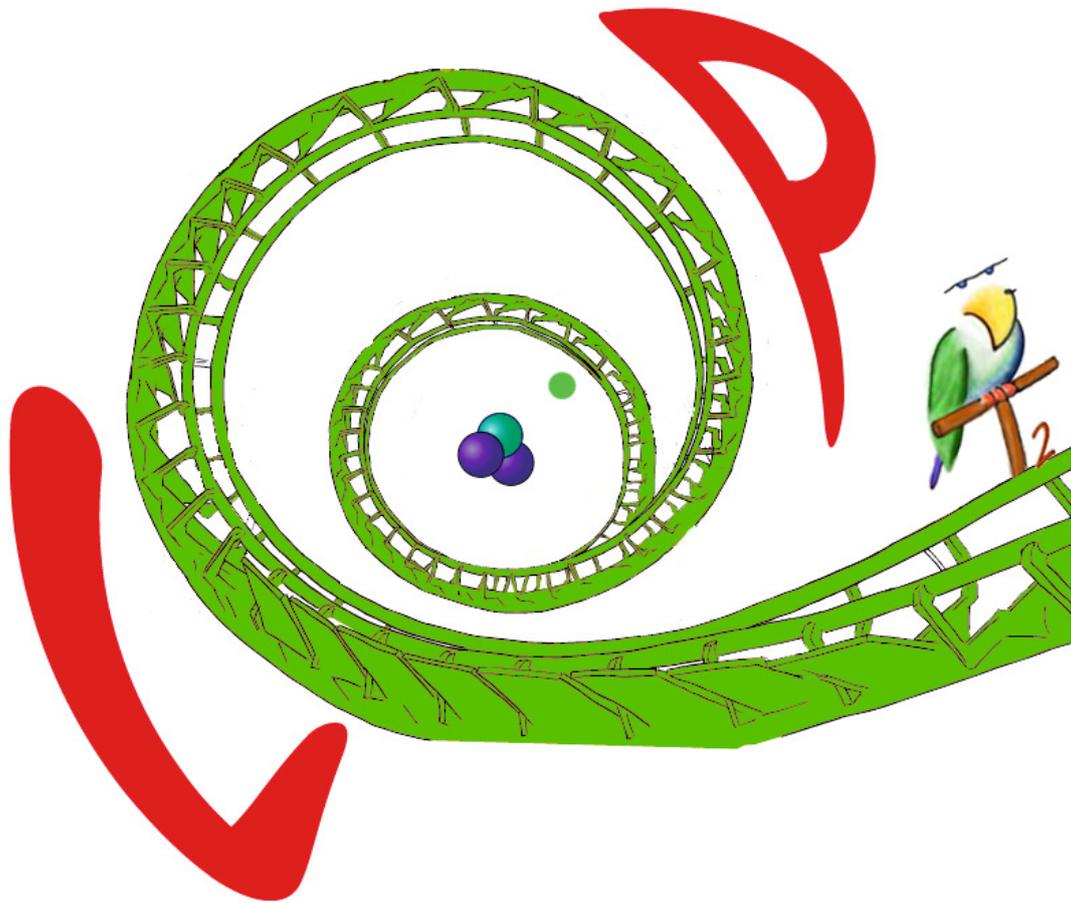
Korreferent Prof. Dr. T. Müller

Institut für experimentelle Kernphysik

An der Fakultät für Physik  
der Universität Karlsruhe (TH)

Januar 2010







---

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Das KATRIN Experiment .....	13
2.1 Das Tritium- $\beta$ -Spektrum.....	13
2.2 Der allgemeine Aufbau eines $^3\text{H}$ -Zerfallsexperiments .....	15
2.3 Das MAC-E Filterprinzip .....	16
2.4 Die Anforderungen an KATRIN .....	19
2.5 Das Quell- und Transportsystem von KATRIN (STS).....	21
2.5.1 Die fensterlose gasförmige Tritiumquelle WGTS.....	21
2.5.2 Die Differentielle Pumpstrecke DPS2-F .....	23
2.5.3 Die kryogene Pumpstrecke CPS.....	25
2.5.4 Das rückwärtige System.....	25
2.6 Spektrometer und Nachweissystem .....	26
2.6.1 Das Vorspektrometer.....	26
2.6.2 Das Hauptspektrometer .....	27
2.6.3 Der Detektor .....	30
3. Die Tritiumkreisläufe im Tritiumlabor Karlsruhe .....	32
3.1 Physikalische Anforderungen und Designkriterien .....	32
3.2 Das Konzept der Tritiumkreisläufe.....	33
3.2.1 Der „Inner Loop“.....	34
3.2.2 Der „Outer Loop“ und das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK).....	35
3.3 Beschreibung des Handschuhboxenteils.....	37
3.4 Die Hauptkomponenten im Loop .....	39
3.4.1 Die Permeatoren .....	39
3.4.2 Die Ventile, Drucksensoren und Flussregler.....	40
3.4.3 Die Pumpen .....	41
3.4.4 Die Prozessleit- und Sicherheitssysteme .....	44
3.5 Qualitätssicherung und Inbetriebnahme .....	44

4. Verfahrertechnische Inbetriebnahme des Inner Loop und Messungen.....	53
4.1 Einstellung der optimalen Regelparameter.....	54
4.2 Übersicht der Messphasen .....	57
4.3 Die Verfahrenstechnische Inbetriebnahme – Run 1 .....	57
4.4 Der Stickstofftestlauf – Run 2 .....	62
4.5 Die Deuteriumtestläufe (Run 3 bis Run 5) .....	67
4.5.1 Deuteriumtestlauf – Run 3 .....	67
4.5.2 Deuteriumtestlauf – Run 4 .....	69
4.5.3 Deuteriumtestlauf – Run 5 .....	73
4.6 Äußere Einflüsse auf die Druckstabilisierung .....	77
4.6.1 Verhalten bei Sollwertänderung (Einschwingverhalten) .....	77
4.6.2 Demonstration der Druckstabilisierung bei verschiedenen Sollwert- Vorgaben.....	79
4.6.3 Demonstration der Druckstabilisierung bei veränderlichen Temperaturen der WGTS-Attrappe .....	81
4.7 Diskussion der Ergebnisse in Bezug auf KATRIN .....	84
5. Zusammenfassung und Ausblick .....	86
Anhang.....	90
Anhang A - Berechnung der Aktivität in den Loopsystemen.....	90
Anhang B - Berechnung der Ansprechzeit eines Drucksensors auf ein entstehendes Leck .....	91
Anhang C - Berechnung der Auflösung des ADC von RPM80102 und RPM80103 .....	92
Anhang D - Fourierspektren der Runs 4 und 5 ([dB] über [Hz]) .....	94
Anhang E - Überblick über die VCR und CF Verbindungstechnik .....	95
Anhang F - Magnetfeldkarte im Bereich der ISS-Box .....	97
Anhang G - Datenblätter von Sensoren, Pumpen, Ventilen (u. A. zur Volumenbestimmung).....	98

---

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Neutrinomassen im hierarchischen und degenerierten Fall .....	4
Abbildung 2.1: Tritium $\beta$ -Spektrum. ....	15
Abbildung 2.2: Resultate bisherige $^3\text{H}$ Zerfallsexperimente .....	16
Abbildung 2.3: Prinzip eines MAC-E Filters.....	17
Abbildung 2.4: KATRIN Gesamtexperimentaufbau. ....	20
Abbildung 2.5: Quell- und Transportstrecke. ....	21
Abbildung 2.6: Dichteprofil in der WGTS Quelle.....	22
Abbildung 2.7: 3-D Ansicht der DPS2-F .....	24
Abbildung 2.8: DPS2-F bei der Ankunft am Forschungszentrum.....	24
Abbildung 2.9: Kryogene Pumpstrecke CPS .....	26
Abbildung 2.10: Vorspektrometer .....	27
Abbildung 2.11: 3D Außenansicht des Hauptspektrometers mit Luftspulensystem. ....	29
Abbildung 2.12: Blick in den KATRIN Hauptspektrometertank. ....	29
Abbildung 2.13: Prototyp des Detektors (links) und 3D Ansicht (rechts).....	31
Abbildung 3.1: Vereinfachtes Schema des Tritium Loop mit WGTS/DPS1 .....	33
Abbildung 3.2: Tritiumkreisläufe im TLK. ....	36
Abbildung 3.3: Vereinfachtes Flussdiagramm des Handschuhboxenteils.....	37
Abbildung 3.4: Funktionsprinzip einer Spiraltaumelpumpe (Scroll-pump) .....	42
Abbildung 3.5: Schematischer Aufbau einer Metallfaltenbalg Pumpe.....	43
Abbildung 3.6: Beispiele für fehlerhafte Schweißungen. ....	47
Abbildung 3.7: Schematische Darstellung des Spül- und Trocknungsaufbaus ...	48
Abbildung 3.8: Fotografien und CAD Zeichnungen zweier Leitungen.....	49
Abbildung 3.9: Der Aufbau vor und nach der Montage aller Leitungen .....	50
Abbildung 3.10: Resultat des integralen Heliumlecktests. ....	52

Abbildung 4.1: Farbschema der Diagramme und Verteilung der Messstellen. ...	53
Abbildung 4.2: Parameteroptimierung am Beispiel der Heizung von TBN80100. ....	55
Abbildung 4.3: Fitfunktion an die Temperaturschwankung von TBN80100. ....	56
Abbildung 4.4: Druckschwankungen an RPM80103 bei Sollwert $p=10$ mbar und $p=15$ mbar. ....	58
Abbildung 4.5: Übersicht der Drücke, Temperaturen und Gasflüsse bei Run 1.	59
Abbildung 4.6: Histogramm zur Druckverteilung im WGTS Pufferbehälter. ....	61
Abbildung 4.7: Übersicht der Drücke, Temperaturen und Gasflüsse bei Run 2 (1-15mbar).....	62
Abbildung 4.8: Druckschwankungen Run 2 an RPM80103 und RPM80102 bei 1 mbar. ....	63
Abbildung 4.9: Druckschwankungen Run 2 an RPM80103 und RPM80102 bei 10 mbar. ....	64
Abbildung 4.10: Druckschwankungen Run 2 an RPM80103 und RPM80102 bei 20 mbar. ....	64
Abbildung 4.11: Histogramm Run 2 Drucksensor RPM80102 bei 1 mbar Sollwert. ....	65
Abbildung 4.12: Histogramm Run 2 Drucksensor RPM80102 bei 10 mbar Sollwert. ....	66
Abbildung 4.13: Histogramm Run 2 Drucksensor RPM80102 bei 20 mbar Sollwert. ....	66
Abbildung 4.14: Balgbruchindikator einer Metal Bellows Pumpe. ....	67
Abbildung 4.15: Druckverlauf von RPM80102 bei Run 3. ....	68
Abbildung 4.16: Übersicht der Drücke, Temperaturen und Gasflüsse bei Run 4.	70
Abbildung 4.17: Druckschwankungen Run 4 an RPM80103 und RPM80102 bei 15 mbar. ....	71
Abbildung 4.18: Histogramm Run 4 Drucksensor RPM80102 bei 15 mbar Sollwert. ....	71
Abbildung 4.19: Fouriertransformation der Messwerte von RPM80102 bei Run 4. ....	72
Abbildung 4.20: Druckschwankungen an RPM80103 und RPM80102 bei 15 mbar. ....	73
Abbildung 4.21: Übersicht der Drücke, Temperaturen und Gasflüsse bei Run 5.	74
Abbildung 4.22: Histogramm Drucksensor RPM80102 bei 15 mbar Sollwert. ....	75

---

Abbildung 4.23: Fouriertransformation der Messwerte von RPM80102 bei Run 5.....	76
Abbildung 4.24: Einschwingverhalten bei Sollwertänderung in TBN80100. ....	78
Abbildung 4.25: Druckstabilisierung Run 2 bei unterschiedlichen Sollwerten.....	80
Abbildung 4.26: Temperaturvariation Run 5 an der WGTS Attrappe.....	82
Abbildung 4.27: Temperaturvariation Run 2 des WGTS Pufferbehälters.....	83
Abbildung A.1: Zur Definition der Auflösung eines Analog-Digital-Konverters.....	92
Abbildung A.2: Fourierspektrum der Daten aus Run 4. ....	94
Abbildung A.3: Fourierspektrum der Daten aus Run 5. ....	94
Abbildung A.4: Swagelok VCR Verbindungstechnik. ....	95
Abbildung A.5: CF-Flansch (Rohr und Blinddeckel) mit Kupferdichtscheibe. ...	96
Abbildung A.6: Magnetfeldkarte im Bereich der ISS Handschuhbox im TLK Gebäude. ....	97

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1	Die fundamentalen Leptonen des Standardmodells.....	2
Tabelle 1.2	Zusammenfassung einiger aktueller Neutrinoexperimente .....	8
Tabelle 4.1	Übersicht der optimierten Regelparameter .....	55
Tabelle 4.10	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	85
Tabelle 4.2	Übersicht Fitgrößen .....	56
Tabelle 4.3	Übersicht der Messphasen .....	57
Tabelle 4.4	Statistische Parameter Run 1 bei 10 mbar und 15 mbar.....	60
Tabelle 4.5	Statistische Parameter Run 2 bei 1, 10 und 20 mbar .....	65
Tabelle 4.6	Statistische Parameter Run 3 bei 10 mbar .....	69
Tabelle 4.7	Statistische Parameter Run 4 bei 15 mbar .....	72
Tabelle 4.8	Statistische Parameter Run 5 bei 15 mbar .....	75
Tabelle 4.9	Statistische Parameter bei unterschiedlichen Sollwertvorgaben .....	80
Tabelle A.1	Berechnung der Volumina in den Teilsystemen.....	90
Tabelle A.2	Berechnung der Aktivität in den Teilsystemen.....	90
Tabelle A.3	Berechnung der Zeit bis zur Anzeige eines Lecks.....	91





# 1. Einleitung

Bei Neutrinos ( $\nu$ ), den „kleinen Neutronen“ nach Enrico Fermi, handelt es sich um elektrisch neutrale Leptonen. Sie unterliegen lediglich der schwachen Wechselwirkung. Als Teilchen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik (SM) besitzen Neutrinos den Spin  $\frac{1}{2}$  (Fermion) sowie eine negative Helizität. Sie besitzen eine äußerst geringe Wechselwirkungswahrscheinlichkeit ( $\sigma = 10^{-43} \text{ 1/cm}^2$ ), da eine Interaktion mit anderer Materie nur über W- und Z-Bosonen stattfinden kann.

Das Gebiet der Neutrinophysik ist noch relativ jung und es werden derzeit viele Experimente durchgeführt oder sind in der Planungs- und Aufbauphase. Im Jahr 2002 erhielten neben Riccardo Giacconi für Arbeiten auf dem Gebiet der Röntgenastronomie Raymond Davis Jr. (Homestake) und Masatoshi Koshiba (Kamiokande) zu gleichen Teilen den Nobelpreis für ihre Arbeiten auf dem Gebiet der Neutrinophysik.

Nach dem SM existieren neben Leptonen auch Quarks und Austauschbosonen [Ber06] (Tabelle 1.1). Diese werden im Rahmen des SM in drei Generationen oder Familien eingeteilt. So ist der Partner des leichtesten Teilchens, des Elektrons, das Elektron-Neutrino  $\nu_e$ . Der Partner des Myons ist das Myon-Neutrino  $\nu_\mu$ . Die dritte Generation bildet das Tauon mit dem Tauon-Neutrino  $\nu_\tau$ . Außerdem existieren sechs Quarks, je zwei pro Generation: „up“ und „down“, „charm“ und „strange“ sowie „top“ und „bottom“. Außerdem besitzt jedes Fermion  $e^-$ ,  $\mu^-$ ,  $\tau^-$  ein entsprechend elektrisch gegensätzlich geladenes Antifermion  $e^+$ ,  $\mu^+$ ,  $\tau^+$ . Antifermionen besitzen zwar die gleiche Masse wie das entsprechende Fermion, jedoch entgegengesetzte Ladung, Farbe und dritte Komponente des schwachen Isospins. Tabelle 1.1 fasst die drei Familien nochmals zusammen.

Das Neutrino wurde 1930 von Wolfgang Pauli postuliert. Er bezeichnete damals in einem Brief an die Tagung der „Gruppe der Radioaktiven“ [Pau30] diese Teilchen noch als Neutronen und führte sie ein, um das bis dato nicht verstandene, kontinuierliche Betaspektrum zu erklären. Lise Meitner und ihre Kollegen beobachteten damals nämlich nicht wie erwartet eine einzelne scharfe Linie im Energiespektrum einer Atomsorte beim deren Zerfall, sondern eine kontinuierliche Energieverteilung der Betateilchen (Elektronen).

**Tabelle 1.1: Die fundamentalen Leptonen des Standardmodells**

Familie	1	2	3
Leptonen	$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$

Niels Bohr sah darin schon die Energieerhaltung verletzt, doch durch das Postulat von Wolfgang Pauli konnte man die Energieerhaltung retten und das Spektrum erklären. Das Neutron (jetzt Neutrino) trägt einen statistisch verteilten Teil der beim Zerfall frei werdenden Energie mit sich was zu einem kontinuierlichen Spektrum des ebenfalls emittierten Elektrons führt.

Es dauerte jedoch noch bis ins Jahr 1956, bevor es Frederick Reines und Clyde L. Cowan gelang, am Savannah River Nuklearreaktor in den USA den ersten experimentellen Nachweis für die Existenz von Neutrinos zu liefern [Rei59]. Als Grundlage diente der inverse Betazerfall.

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ \quad (1.1)$$

Im Rahmen des Standardmodells der Teilchenphysik wurde das Neutrino lange Zeit als masselos betrachtet. Besitzt das Neutrino jedoch eine Masse, so können Neutrinooszillationen existieren, wie Bruno Pontecorvo 1957 erkannte [Pon57].

Aufgrund verschiedener, im Folgenden noch näher erläuteter, Experimente gilt die Existenz von Neutrinooszillationen mittlerweile als gesichert. Unterschiedliche Neutrinogenerationen müssen demzufolge auch unterschiedliche Massen besitzen. Dies impliziert, dass nicht alle Massen gleich Null sein können.

Man kann die Neutrinooszillationen dadurch erklären, dass die Flavoreigenzustände  $|\nu_\alpha\rangle$  mit  $\alpha = e, \mu, \tau$  ungleich den Masseneigenzuständen  $|\nu_i\rangle$  mit  $i=1, 2, 3$  sind. Die Neutrinos werden durch die schwache Wechselwirkung in einem Flavoreigenzustand erzeugt, welcher eine Überlagerung von Masseneigenzuständen darstellt. Sie sind über eine unitäre Transformation miteinander verbunden, welche formal an die CKM Matrix erinnert ([Alt03], [GAI03], [Fuk03], [PDG08]):

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle \quad (1.2)$$

bzw.

$$|\nu_i\rangle = \sum_\alpha U_{\alpha i} |\nu_\alpha\rangle \quad (1.3)$$

Mit  $U$  bezeichnet man hierbei die leptoniche Mischungsmatrix.

Um nun eine Oszillation zeigen zu können benötigt man die zeitliche Entwicklung der Masseneigenzustände. Diese erhält man, indem man mit dem Zeitentwicklungsoperator multipliziert [Fuk03]:

$$|v_{i(t)}\rangle = e^{-\frac{iE_i t}{\hbar}} |v_i\rangle \quad (1.4)$$

$$\text{mit } E_i = \sqrt{p^2 \cdot c^2 + m_i^2 \cdot c^4} \underset{p \gg m_i c}{\approx} p \cdot c + \frac{m_i^2 \cdot c^3}{2 \cdot p} \quad (1.5)$$

Somit erhält man einen Ausdruck, welcher beschreibt, wie sich ein reiner Flavoreigenzustand als Funktion der Flugzeit  $t$  in einen Zustand

$$|v_{(t)}\rangle = \sum_i U_{\alpha i} \cdot e^{-\frac{iE_i t}{\hbar}} |v_i\rangle = \sum_{\alpha, \beta} U_{\alpha i} \cdot U_{\beta i}^* \cdot e^{-\frac{iE_i t}{\hbar}} |v_{\beta}\rangle \quad (1.6)$$

umwandelt [Fuk03]. Unterschiedliche Masseneigenzustände besitzen auch eine zeitlich unterschiedliche Entwicklung.

Da die Übergangswahrscheinlichkeit  $P$  von einem Zustand  $\alpha$  in einen Zustand  $\beta$  mit der Differenz der Masseneigenzustände zusammenhängt, liegt hierin auch die Begründung für mindestens eine nicht verschwindende Neutrinomasse [Fuk03]

$$P_{(\alpha \rightarrow \beta, t)} = \sum_i \underbrace{|U_{\alpha, i} \cdot U_{\beta, i}^*|^2}_{\text{mittlere Übergangswahrscheinlichkeit}} + 2 \cdot \text{Re} \underbrace{\sum_{j>i} U_{\alpha, i} \cdot U_{\alpha, j}^* \cdot U_{\beta, i} \cdot U_{\beta, j}^* \cdot e^{-i \frac{(E_i - E_j) t}{\hbar}}}_{\text{zeitabhängige Übergangswahrscheinlichkeit}}.$$

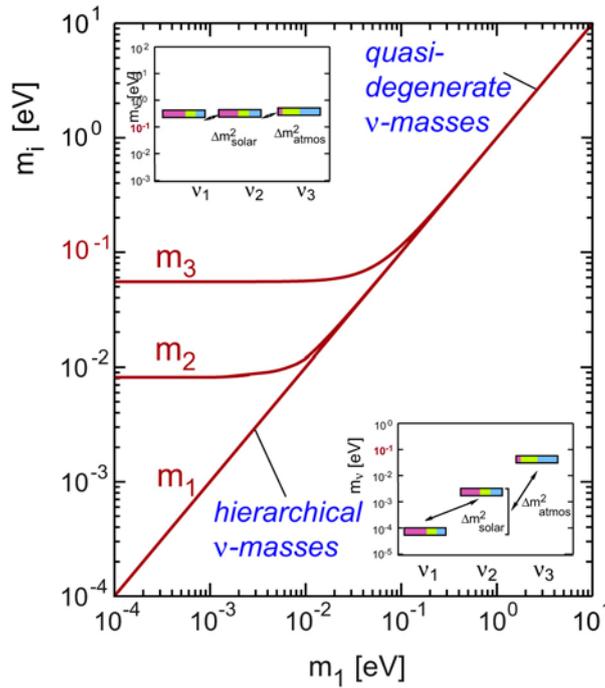
$$\text{mit } E_i - E_j \propto \Delta m_{i, j}^2 \quad (1.7)$$

Der dominierende Oszillationskanal bei solaren Neutrinos ist  $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu, \tau}$ . Bei atmosphärischen Neutrinos dominiert  $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu}$  [Fuk03]. Betrachtet man einen vereinfachten Fall von nur zwei Flavoreigenzuständen ( $|v_e\rangle, |v_{\mu}\rangle$ ), so erhält man vereinfacht

$$\begin{pmatrix} |v_e\rangle \\ |v_{\mu}\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |v_1\rangle \\ |v_2\rangle \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

und für die Wahrscheinlichkeit, ein  $\nu_e$  im Abstand  $L$  mit der Energie  $E$  als  $\nu_{\mu}$  zu finden

$$P_{(\nu_e \rightarrow \nu_{\mu}, L)} = \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E}\right). \quad (1.9)$$



**Abbildung 1.1: Neutrinomassen im hierarchischen und degenerierten Fall**

Gezeigt sind Masseneigenwerte  $m_i$  als Funktion von  $m_1$ . Die Massendifferenzen wurden durch  $\nu$ -Oszillationsexperimente bestimmt. Die Abbildung zeigt die beiden Möglichkeiten einer hierarchischen sowie einer quasidegenerierten Massenskala [KAT04].

Es geht hier neben dem Mischungswinkel  $\theta$  nur noch die Differenz der Massenquadrate  $\Delta m^2$  ein. Oszillationsexperimente sind daher nicht in der Lage, eine absolute Aussage über Neutrinomassen zu machen, da diese lediglich die Differenzen der Massen der Neutrinos aus den unterschiedlichen Generationen bestimmen können.

Aktuelle Werte für die Differenz der Massenquadrate sind [PDG08]:

$$\Delta m_{1,2}^2 = (8,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}^2}{c^4} \quad (90\% \text{ C.L.}) \quad (1.10)$$

$$1,9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{eV}^2}{c^4} < \Delta m_{2,3}^2 < 3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{eV}^2}{c^4} \quad (90\% \text{ C.L.}) \quad (1.11)$$

In theoretischen Untersuchungen werden derzeit zwei Wege zur Erklärung der Neutrinomassen verfolgt, wie Abbildung 1.1 illustriert ([Fuk03], [GAI03]):

- ◆ quasidegenerierte Massenskala mit  $m_1 \approx m_2 \approx m_3$  und  $m_{\nu,1,2,3} \approx 0,2 \dots 2 \text{ eV}/c^2$ . Alle drei Neutrinosorten besitzen in etwa die gleiche Masse, welche im Vergleich zu den Masseunterschieden groß ist.

- ♦ hierarchische Massenskala mit kleinen  $m_{\nu_{1,2,3}} < 0,2 \text{ eV}/c^2$  und  $m_1 < m_2 < m_3$ . Die Neutrinomassen sind klein verglichen mit den Massendifferenzen.

Tatsächlich konnten mit Hilfe von Neutrinoexperimenten, welche den solaren Neutrinofluss auf der Erde untersuchten, erste Anzeichen von nicht verschwindenden Neutrinomassen festgestellt werden. Da gegenüber den Vorhersagen zu wenig Neutrinos (welche von unserer Sonne in großer Anzahl produziert werden) gemessen wurden, sprach man anfangs von einem „solaren Neutrinoproblem“ [Bah04]. Es fanden auf diesem Gebiet einige Schlüsselexperimente statt; exemplarisch seien hier vier davon aufgezeigt:

- ♦ Die Kamiokande-Experimente (Kamiokande 1/2/3 und jetzt Superkamiokande) versuchen Neutrinos über elastische Neutrino-Elektronstreuung nachzuweisen ([Hos06], [Hir89]):



Da der Wirkungsquerschnitt von  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$  etwa um einen Faktor sieben kleiner ist als der von  $\nu_e$ , werden praktisch nur  $\nu_e$  nachgewiesen. Als Detektor dient bei allen Kamiokandeexperimenten ein Wassertank, welcher mit Photomultipliern bestückt ist. In der aktuellen Version Superkamiokande wird eine Masse von 50000 Tonnen Wasser von 11200 Photomultipliern beobachtet.

Stößt nun ein Neutrino auf ein Elektron im Wassertank, so wird vom beschleunigten Elektron Cherenkov-Strahlung erzeugt, welche dann in den Photomultipliern nachgewiesen werden kann. Die Vorteile von Cherenkov-Experimenten gegenüber radiochemischen sind, dass hier eine Richtungsrekonstruktion möglich ist, sowie eine Zeitbestimmung des Ereignisses gemacht werden kann.

Auch die Kamiokande-Experimente registrierten einen um einen Faktor zwei bis drei zu kleinen Neutrinofluss verglichen mit dem Standard-Sonnen-Modell (SSM) und konnten das solare Neutrinoproblem nicht lösen ([Hos06], [Hir89]).

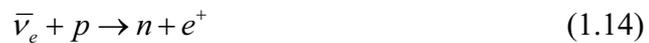
- ♦ Homestake Chlorine Experiment ([Dav94], [Dav96], [Cle95]): Der am Brookhaven National Laboratory gebaute Neutrinodetektor in der Homestake Gold Mine besteht aus 615 Tonnen Tetrachlorethylene. Die Abschirmung durch die Lage der Mine entspricht einem Wasseräquivalent von 4200 m [Hom09]. Mit Hilfe radiochemischer Methoden wird das durch Neutrinoeinfang aus  $^{37}\text{Cl}$  nach



gebildete  $^{37}\text{Ar}$  extrahiert und registriert. Die Datennahme erfolgte von 1970 bis 1994. Es wurde dabei ebenfalls ein um einen Faktor zwei bis drei geringerer Neutrinofluss als vom SSM vorausgesagt gemessen.

Weitere radiochemische Experimente waren *Gallex* und *SAGE*. Beide verwendeten  $^{71}\text{Ga}$  zum Nachweis. Alle Experimente dieses Types sind nur sensitiv auf Elektronneutrinos  $\nu_e$  und registrierten ein Defizit um einen Faktor zwei bis drei ([Alt05], [GAL99], [Abd02]).

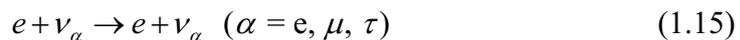
- ◆ KamLAND (Komioka Liquid Anti-Neutrino-Detector) [Ara04]: Hierbei handelte es sich um ein Experiment zum Nachweis von Neutrinos aus Kernreaktoren in Japan. Hier taucht wieder das Neutrino Defizit auf [Kam08]. Benutzt wird der inverse Betazerfall



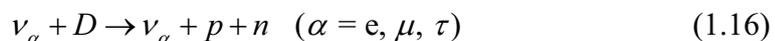
Alle oben genannten Experimente waren nur auf Elektronneutrinos  $\nu_e$  sensitiv. Ein Experiment, welches auch  $\nu_\mu$  sowie  $\nu_\tau$  registrieren konnte, war also notwendig:

- ◆ SNO (Sudbury Neutrino Observatory) ([SNO00], [SNO01], [SNO02]): Hier wurden 1000 t  $\text{D}_2\text{O}$  (schweres Wasser) als Target benutzt, welches sich in einem sphärischen Acryltank 2km unter der Oberfläche in der Creighton Mine in der Nähe von Sudbury/Kanada befindet. Das Experiment wurde 2006 beendet. Mit  $\text{D}_2\text{O}$  erfolgt der Neutrino nachweis auf drei verschiedene Arten.

- ◆ elastische Elektron-Neutrino-Streuung (Energieschwelle 6,7 MeV):



- ◆ neutrale schwache Ströme (Energieschwelle 2,2 MeV):



- ◆ geladene schwache Ströme (Energieschwelle 1,4 MeV):



Die Reaktionen aus (1.15) und (1.17) sind empfindlicher auf Elektronneutrinos  $\nu_e$  ( $\nu_e$  können mit e sowohl über geladene als auch neutrale Ströme wechselwirken, eine Streuung ist also häufiger). Mit (1.16) ist es jedoch auch möglich, Myon-Neutrinos  $\nu_\mu$  und Tauon-Neutrinos  $\nu_\tau$  zu registrieren. Dadurch konnte man den

vom Standard-Sonnenmodell [Bah03] vorausgesagten Fluss solarer Neutrinos auch experimentell bestätigen.

Daneben gibt es eine Vielzahl weiterer Experimente, welche teilweise bereits abgeschlossen sind bzw. sich noch in der Aufbauphase befinden. Eine Auswahl ist in Tabelle 1.2 angeführt.

Es besteht nicht nur ein großes teilchenphysikalisches Interesse an der Kenntnis der Neutrinomasse, sondern auch für die Astrophysik ist diese Kenngröße interessant. Dies zeigt auch schon die große Anzahl an Experimenten, welche nach Neutrinos aus dem Universum suchen. Neutrinos entstanden in der ersten Phase des Urknalls (während den ersten Sekunden) in großer Zahl [Gru05]. Dies erfolgte ganz analog zu den Photonen welche wir heute als Hintergrundstrahlung bei 2,7 K wahrnehmen können. Die Anzahl der dabei entstandenen Neutrinos liegt dabei mit  $112 \text{ Neutrinos}/(\text{Flavor}\cdot\text{cm}^3)$  in der gleichen Größenordnung wie die der Photonen und ca.  $10^9$  mal höher als die gesamte Anzahl an Baryonen im Universum ([Gru05], [Ber06]). Da es sich bei „unserem“ Universum nach derzeitigem Kenntnisstand um ein Universum mit  $\Omega \approx 1$  handelt, wird eine wesentlich höhere Energiedichte zur Erklärung benötigt, als (leuchtende) Materiedichte beobachten kann [Mat03].  $\Omega \approx 1$  bedeutet dabei, dass es sich um ein flaches Universum, in welchem die Winkelsumme eines Dreiecks exakt  $180^\circ$  ergibt (ein euklidischer Raum) handelt. Neben der noch völlig unklaren Dunklen Energie, welche ca. 70% der gesamten Energiedichte stellt, trägt (kalte) Dunkle Materie zu etwa 26% und (baryonische) Materie zu 4% bei [Han06]. Einen kleinen Teil von  $\sim 1\%$  der insgesamt 26% Dunklen Materie könnten die Neutrinos in Form von sogenannter *Heißer Dunkler Materie (HDM)* stellen [Pap07]. Als „heiß“ wird diese bezeichnet, da sich die Teilchen fast lichtschnell bewegen. Diese können jedoch im derzeit favorisierten Modell auf keinen Fall den dominierenden Anteil an Dunkler Materie stellen, da sich sonst keine Strukturbildung im Universum hätte durchsetzen können, wie sie heute z.B. durch Programme wie den Sloan Digital Sky Survey (SDSS [Sky09]) oder den 2degree Field Galaxy Redshift Survey (2dFGRS [Tdf09]) beobachtet wird.

Somit führt die Kenntnis der Neutrinomasse auch zu einem tieferen Verständnis astrophysikalischer Vorgänge und der Bildung des Universums an sich, wie es heute beobachtet werden kann. Dies beruht auf der Tatsache, dass eine bekannte Neutrinomasse die Vielzahl der Parameter existierender Theorien einzuschränken vermag. Jedoch beinhaltet eine Abschätzung der Neutrinomasse mit Hilfe Astrophysikalischer Daten immer eine Unsicherheit aufgrund einiger unbekannter Parameter der einzelnen Modelle. Daher ist es unabdingbar, dass eine Überprüfung der Neutrinomasse im Labor mittels einer modellunabhängigen Methode durchgeführt wird. Dazu können direkte als auch indirekte Methoden zur Anwendung kommen. Diese sollen im Folgenden näher erläutert werden.

**Tabelle 1.2:** Zusammenfassung aktueller Neutrinodetektoren. Die Schwellenenergie bezeichnet dabei die Energie, ab welcher Neutrinos nachgewiesen werden können (Mindestenergie des  $\nu$ ). <sup>(1)</sup> geplant, <sup>(2)</sup> im Aufbau, <sup>(3)</sup> Datennahme, <sup>(4)</sup> beendet).

Experiment	Sensitivität	Detektortyp	Detektor- material	Schwellen- energie	Quellverweis
GALLEX <sup>(4)</sup>	Solare $\nu_e$	Radiochemisch	GaCl <sub>3</sub> , 30t	233,2 keV	[GAL99]
Double Chooz <sup>(2)</sup>	Reaktor- $\nu_e$	Szintillator	Gd-Komplex	1,8 MeV	[DCH06]
Super-Kamiokande <sup>(3)</sup>	solare $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ und $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ von KEK	Cherenkov	50 kt Wasser (H <sub>2</sub> O)	~MeV	[Hos06], [Hir89]
OPERA <sup>(3)</sup>	$\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ von CERN (CNGS)	Hybrid	Pb Emulsion+ Myondetektor, 2 kt	4,5 GeV	[OPE09]
IceCube <sup>(2,3)</sup>	solare, atmosphärische, kosmische $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$	Cherenkov	Wasser-Eis, 1km <sup>3</sup>	10 MeV	[ICE01]
SNO <sup>(4)</sup>	Solare und atmosphärische $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$	Cherenkov	1 kt D <sub>2</sub> O	6,75 MeV	[SNO00], [SNO01], [SNO02]
KamLAND <sup>(3)</sup>	Reaktor- $\nu_e$	Szintillator	1 kt	100 keV	[Ara04]
Kamiokande <sup>(4)</sup>	solare und atmosphärische $\nu_e$	Cherenkov	Wasser (H <sub>2</sub> O)	7,5 MeV	[Hos06], [Hir89]
Homestake-Chlorine <sup>(4)</sup>	Solare $\nu_e$	Radiochemisch	C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> , 615 t	814 keV	[Dav94], [Dav96], [Cle95]

- ♦ *Indirekt:* Kosmologische Abschätzungen: Wie bereits erwähnt, würden Neutrinos mit großen Massen in Form von HDM die Strukturbildung in einem „bottom-up“ Szenario im Universum erschweren oder sogar ganz verhindern. Auch in der 2,7 K Hintergrundstrahlung hinterlässt die Masse von Neutrinos im Spektrum Spuren. Aus bisher gewonnenen Daten lässt sich ein Ergebnis zu

$$\sum_{i=e,\mu,\tau} m_{\nu_i} < 0,42 \frac{\text{eV}}{c^2} \quad (95\% \text{ C.L.}) \quad (1.18)$$

bestimmen. Dabei handelt es sich zwar um eine sehr sensitive Methode, welche jedoch nicht modellunabhängig ist [Sel04].

- ♦ *Indirekt:* Neutrinoloser Doppelbetazerfall ( $0\nu\beta\beta$ ): Der Doppel-Beta-Zerfall tritt bei Isotopen auf, für welche ein einfacher Betazerfall energetisch verboten ist. Dies kann bei Kernen mit einer geraden Anzahl Protonen und Neutronen (gg-Kerne) der Fall sein. Die Grundzustände dieser Kerne liegen energetisch tiefer als die ihrer ungerade-ungerade (uu) Nachbarn. Der Doppel-Beta-Zerfall kann als  $\beta^+$  als auch  $\beta^-$  Zerfall auftreten. Man kann sich den Doppel-Beta-

Zerfall als zwei gleichzeitige Betazerfälle vorstellen. Die Leptonenzahl bleibt dabei erhalten.

$$\begin{aligned}\beta^- : (A, Z) &\rightarrow (A, Z+2) + 2 \cdot e^- + 2 \cdot \bar{\nu}_e \\ \beta^+ : (A, Z) &\rightarrow (A, Z-2) + 2 \cdot e^+ + 2 \cdot \nu_e\end{aligned}\quad (1.19)$$

Da sich beim neutrinolosen Doppel-Beta-Zerfall die Leptonenzahl um  $\Delta L=2$  ändert, ist dieser nach dem Standardmodell verboten.

$$\begin{aligned}(0\nu\beta\beta)\beta^- : (A, Z) &\rightarrow (A, Z+2) + 2 \cdot e^- \\ (0\nu\beta\beta)\beta^+ : (A, Z) &\rightarrow (A, Z-2) + 2 \cdot e^+\end{aligned}\quad (1.20)$$

Dies ist nur möglich, wenn

- ♦ das Neutrino sein eigenes Antiteilchen ist ( $\nu = \bar{\nu}$ ), was es zu einem Majoranateilchen macht.
- ♦ die beiden beim neutrinolosen Doppelbetazerfall virtuell ausgetauschten Neutrinos eine gemischte Helizität besitzen. Dies ist notwendig, da am ersten Vertex ein linkshändiges Neutrino emittiert, am zweiten Vertex jedoch ein rechtshändiges Neutrino absorbiert wird. Der Vorgang ist nur bei massebehafteten Teilchen möglich. Vermeiden könnte man dies nur durch eine Erweiterung des Standardmodells um rechtshändige, geladene schwache Ströme.

Mit Hilfe des neutrinolosen Doppelbetazerfalls kann man in Bezug auf die Masse des Neutrinos zwei Aussagen machen:

- ♦ wird der  $0\nu\beta\beta$  beobachtet, so kann die Neutrinomasse aus der gemessenen Halbwertszeit berechnet werden. Das Heidelberg-Moskau-Experiment, welches den Zerfall  ${}^{76}\text{Ge} \rightarrow {}^{76}\text{Se}$  untersuchte, meldete bei einem Konfidenzlevel von  $6\sigma$  eine Neutrinomasse von [KKG06]

$$m_{\nu_e} = 0,32 \frac{\text{eV}}{c^2}\quad (1.21)$$

- ♦ wird der  $0\nu\beta\beta$  nicht beobachtet, so kann man eine Obergrenze der Neutrinomasse angeben wenn man die Annahme einfließen lässt, dass Neutrinos Majoranateilchen sind.

Eine Bestätigung des Resultates des Heidelberg-Moskau-Experiments durch andere Experimente steht zurzeit noch aus.

- ♦ *Direkt:* Flugzeitmessung (Time of Flight, ToF): Es wird die Zeit gemessen, welche ein Teilchen definierter Energie für eine definierte Strecke zwischen zwei Detektorebenen benötigt. Die Gültigkeit der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung ist dabei die einzige Annahme zur Berechnung der Masse des Teilchens.

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \quad (1.22)$$

Kennt man nicht den genauen Zeitpunkt des Aussendens eines Neutrinos, wie es z.B. bei der Supernova SN1987A der Fall war, so bildet man die Differenz der Ankunftszeiten von zwei Teilchen verschiedener Energie und leitet daraus die Masse ab. Die Berechnung ist jedoch mit einer modellabhängigen Startzeitdifferenz ( $\Delta t_0$ ) versehen, was zu unterschiedlichen Voraussagen der Masse führen kann.

$$\Delta t = \Delta t_0 + \frac{L \cdot m_v^2 \cdot c^4}{2 \cdot c} \left( \frac{1}{E_{v,1}^2} - \frac{1}{E_{v,2}^2} \right) \quad (1.23)$$

- ♦ *Direkt:* Untersuchung der Kinematik des schwachen Zerfalls an Collidern: Hierbei wird nicht die Neutrinomasse selbst bestimmt, sondern es werden die geladenen Zerfallsprodukte gemessen. Es handelt sich um einen modellunabhängigen Zugang zur Bestimmung der Masse. Mit grundlegenden Methoden wie Impuls- und Energieerhaltung kann dann auf die Masse des beim Zerfall ebenfalls entstandenen Neutrinos geschlossen werden. Man nutzt  $e^+e^-$  Collider zur Bestimmung der Masse des  $\tau$ -Neutrinos. Dazu wird der Zerfall des  $\tau$  in Pionen und Neutrinos untersucht. Die Masse des  $\mu$ -Neutrinos erhält man durch die Untersuchung des Zerfalls der Pionen. Folgende Werte sind dadurch gegeben ([PDG08], [Bar98]):

$$m_{\nu_\tau} < 18,2 \frac{\text{MeV}}{c^2} \text{ (95\% CL)}, m_{\nu_\mu} < 190 \frac{\text{keV}}{c^2} \text{ (95\% CL)} \quad (1.24)$$

- ♦ *Direkt:* Untersuchung der Kinematik des schwachen Zerfalls von  $^3\text{H}$ : Durch die Kinematik des  $\beta$ -Zerfalls kann man im Prinzip die Masse des  $\nu_e$ -Neutrinos bestimmen. Eine absolute Massenbestimmung ist bis dato ebenfalls noch nicht gelungen. Die momentan niedrigste Obergrenze durch diese Methode wurde bei den Experimenten in Troitsk und Mainz bestimmt. Die beiden Neutrinomassenexperimente nutzten ein Spektrometer vom MAC-E Typ (Funktionsprinzip siehe Kapitel 2.3), welches auch bei einem zukünftigen Neutrinomassenexperiment zum Einsatz kommen wird. Sie besaßen aber andere geometrische Abmessungen sowie Tritiumquellen mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften (Mainz: quench condensed tritium source QCTS, Troitsk: windowless gaseous tritium source WGTS).

Daher ergibt sich auch eine andere systematische Unsicherheit der beiden Experimente.

Das Ergebnis des Troitsk-Experiments lautet nach einer phänomenologischen Korrektur einer Anomalie im Spektrum [Lob99]:

$$m_{\nu_e}^2 = (-2,3 \pm 2,5 \pm 2,0) \frac{\text{eV}^2}{c^2} \quad (1.25)$$

Dies entspricht einer Obergrenze der Neutrinomasse von

$$m_{\nu_e} < 2,5 \frac{\text{eV}}{c} (95\% \text{ C.L.}) \quad (1.26)$$

In Mainz wurden folgende Ergebnisse ermittelt [Kra05]:

$$m_{\nu_e}^2 = (-0,6 \pm 2,2 \pm 2,1) \frac{\text{eV}^2}{c^2} \quad (1.27)$$

$$m_{\nu_e} < 2,3 \frac{\text{eV}}{c} (95\% \text{ C.L.}) \quad (1.28)$$

Diese Ergebnisse stellen die bislang niedrigsten Obergrenzen der Neutrinomassen dar, welche aus direkten Neutrinomassenexperimenten gewonnen wurden. Beide Experimente haben jedoch bereits ihr Sensitivitätslimit erreicht. Weitere Messungen würden aufgrund der systematischen Unsicherheiten keine Verbesserung mehr liefern. Aus diesem Grund wurde ein neues Neutrinomassenexperiment – KATRIN (Kapitel 2) - geplant.

Ist die Masse des  $\nu_e$  bekannt, so ist die Bestimmung der Massen von  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$  nicht mehr notwendig. Die Massendifferenz kann den Resultaten der Oszillationsexperimenten entnommen werden.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des KATRIN Experiments. Die dort verwendete Quelle (windowless gaseous tritium source, WGTS) benötigt einen stabilen Einspeisedruck und eine stabile Einspeiserate von Tritiumgas.

Um dies zu gewährleisten, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit das Tritiuminjektionssystem „Inner Loop“ nach einem vorhandenen Design aufgebaut. Die Aufgabenstellung bestand neben dem Aufbau des Inner Loops ebenfalls in dessen Charakterisierung bezüglich der Stabilität der zur Verfügung gestellten Einspeiserate. Ebenfalls Gegenstand dieser Arbeit war das Finden von optimierten Regelparametern zum Betrieb des Inner Loops.

Die Arbeit gliedert sich in eine allgemeine Einführung in das KATRIN Experiment in Kapitel 2. Daran anschließend folgt eine genauere Beschreibung des Inner Loops. Kapitel 4 beschäftigt sich mit der ersten Datennahme und der entsprechenden Auswertung. Abschließend bringt Kapitel 5 eine Zusammenfassung der gewonnenen Resultate und gibt einen Ausblick auf mögliche weitere Messkampagnen und Verbesserungsmöglichkeiten.

## 2. Das KATRIN Experiment

Kapitel 2 beschäftigt sich mit der allgemeinen Kinematik des Tritium  $\beta$ -Zerfalls. Außerdem wird der prinzipielle Aufbau eines Tritiumzerfallsexperimentes beschrieben und bisherige Ergebnisse präsentiert. Im Verlauf dieses Kapitels wird dann im Besonderen auf das **Karlsruher Tritium Neutrinoexperiment (KATRIN)** eingegangen, dessen Aufbau in den Kapiteln „Quell- und Transportsektion“ und „Spektrometer und Nachweissystem“ beschrieben werden soll. Ziel des KATRIN-Experiments ist die Bestimmung der Elektron-antineutrino-masse mit einer Sensitivität von  $0,2 \text{ eV}/c^2$  (bei 90% C.L. was zu einem  $5\sigma$  Entdeckungspotential für  $m_\nu = 0,35 \text{ eV}/c^2$  führt).

### 2.1 Das Tritium- $\beta$ -Spektrum

Durch die Vermessung der Kinematik des  $\beta$ -Zerfalls kann man eine modellunabhängige Aussage über die Masse des Neutrinos treffen. Als  $\beta$ -Strahler findet Tritium ( ${}^3\text{H}$  oder T) Verwendung.



Da das Neutrino aufgrund seiner schwachen Wechselwirkung nicht selbst detektiert werden kann, erfolgt die Bestimmung der Masse des Elektroneneutrinos über die Vermessung des Energiespektrums der ebenfalls emittierten Elektronen. Deren Energiespektrum lässt sich theoretisch mit Hilfe von Fermi's goldener Regel berechnen [Alt03]:

$$\frac{d^2N}{dt dE} = C \cdot F(E, Z+1) p(E + m_e \cdot c^2) \cdot (E_0 - E) \cdot \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_{\nu_e}^2 \cdot c^4} \theta(E_0 - E - m_{\nu_e} \cdot c^2) \quad (2.2)$$

$E$ ,  $m_e$  und  $p$  bezeichnen die kinetische Energie, die Masse und den Impuls des Elektrons,  $c$  ist die Lichtgeschwindigkeit.  $E_0$  bezeichnet in (2.2) die Endpunktsenergie (siehe dazu auch Abbildung 2.1). Die Coulombwechselwirkung der Elektronen im Endzustand wird durch die Fermifunktion  $F(E, Z+1)$  berücksichtigt. Ein Teilchen (in diesem Fall ein  $\nu$ ) kann natürlich nur dann erzeugt werden, wenn die verfügbare Energie  $\geq$  der Ruhemasse des Teilchens ist. Für die Energieerhaltung Sorge trägt Term  $\theta(E_0 - E - m_{\nu_e} \cdot c^2)$  in (2.2).

Die Konstante ist gegeben durch

$$C = \frac{G_F^2}{2 \cdot \pi^3 \cdot c^5 \cdot \hbar^7} \cdot \cos^2(\theta_c) \cdot |M_{\text{had}}^2| \quad (2.3)$$

Hierin steht  $G_F$  für die Fermikonstante,  $\theta_c$  den Cabibbowinkel und  $M_{\text{had}}$  für das Übergangselement der hadronischen Mischungsmatrix.

Berücksichtigt werden muss noch, dass sich das Hüllenelektron des Tochternuklids in einem angeregten Zustand befinden kann. Dieser Tatsache Rechnung trägt man, indem man die gewichtete Summe der Einzelspektren (2.2) mit unterschiedlicher Endpunktsenergie bildet:

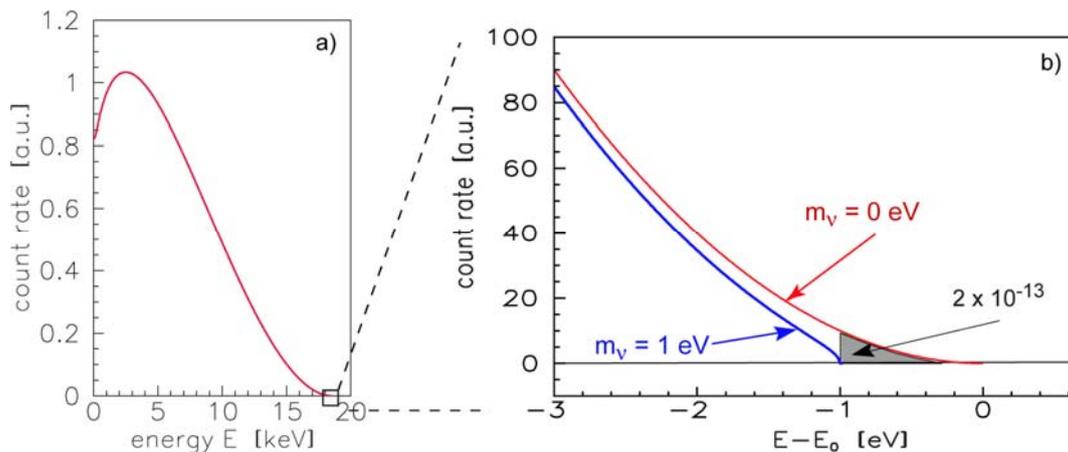
$$\frac{d^2 N}{dt dE} = C \cdot F(E, Z + 1) \cdot p(E + m) \cdot \sum_j W_j \cdot (E_0 - V_j - E) \cdot \sqrt{(E_0 - V_j - E)^2 - m_{\nu_e}^2 c^4} \theta(E_0 - E - m_{\nu_e} \cdot c^2) \quad (2.4)$$

Das Atom endet mit der Wahrscheinlichkeit  $W_j = |\langle \Psi_0 | \Psi_{f,j} \rangle|^2$  im angeregten Zustand, wobei  $V_j$  die Anregungsenergie bezeichnet.

Die Fermifunktion und das Übergangsmatrixelement hängen nicht von der gesuchten Größe (der Masse des Elektronen-neutrinos) ab. Betrachtet man in Gleichung (2.2) den Ausdruck unter der Wurzel, so erkennt man, dass sich der Einfluss der Masse des Elektronen-neutrinos erst nahe dem Endpunkt im  $\beta$ -Spektrum bemerkbar macht. Bedenkt man die geringe Zahl an Ereignissen von  $2 \cdot 10^{-13}$  im korrespondierenden Bereich (bei Verwendung von  ${}^3\text{H}$ , Endpunktsenergie 18,6 keV), so muss man an eine Neutrino-/Elektronenquelle folgende Bedingungen stellen:

- ♦ Die geringe Zählrate in der Nähe des Endpunkts muss durch eine hohe Zerfallsrate ausgeglichen werden.
- ♦ Sehr hohe Energieauflösung des Spektrometers kombiniert mit einem geringen Untergrund sowie einem großen Akzeptanzwinkel als auch einer großen Querschnittsfläche.

Verwendet man Tritium als  $\beta$ -Strahler, so können diese Forderungen abgedeckt werden.  ${}^3\text{H}$  besitzt durch seine verhältnismäßig geringe Endpunktsenergie von 18,6 keV noch eine relativ hohe Zahl an Elektronen welche nahe des Endpunkts zerfallen. Durch die kurze Halbwertszeit von 12,3 Jahren besitzt es eine hohe spezifische Aktivität. Aufgrund eines übererlaubten Übergangs ist das Matrixelement  $M_{\text{had}}$  energieunabhängig. Die relativ einfachen Elektronenhüllen von des Mutternuklids  ${}^3\text{H}$  und Tochternuklids  ${}^3\text{He}$  erlauben eine für die Anforderungen von KATRIN ausreichend genaue Berechnung des Spektrums nach Gl. (2.4).



**Abbildung 2.1: Tritium  $\beta$ -Spektrum.**

Links ist das komplette Spektrum zu sehen, rechts der markierte Endpunkt. Erkennbar ist der Unterschied für ein masseloses Neutrino sowie ein Neutrino mit Masse [KAT04].

Abbildung 2.1 zeigt den Einfluss einer Neutrinomasse ungleich Null ( $m_\nu = 1 \text{ eV}$ ) auf das  $\beta$ -Spektrum. Man erkennt auch hieraus die oben genannten Forderungen bezüglich Quelle und Spektrometer.

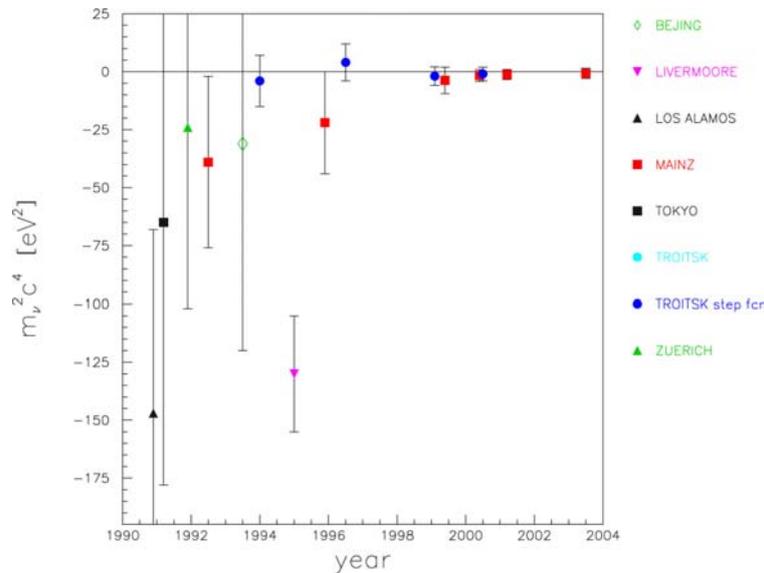
## 2.2 Der allgemeine Aufbau eines $^3\text{H}$ -Zerfallsexperiments

Die bisherigen Tritiumzerfallsexperimente, wie z.B. Troitsk und Mainz, besaßen prinzipiell das gleiche Experimentsetup wie für KATRIN vorgeschlagen:

- ◆ eine Tritiumquelle, die durch  $\beta$ -Zerfall von  $^3\text{H}$  Elektronen zur Verfügung stellt.
- ◆ eine Transportstrecke, welche die Elektronen ins Spektrometer führt und das Tritium zurückhält.
- ◆ ein Spektrometer, mit welchem die Elektronen gefiltert werden.
- ◆ einen Detektor, der die gefilterten Elektronen registriert.

Abbildung 2.2 zeigt die Ergebnisse der bisherigen Tritiumzerfallsexperimente.

Die bisher beste Obergrenze für die Neutrinomasse wurde vom Mainzer Neutrinomassenexperiment bestimmt (siehe Einleitung).



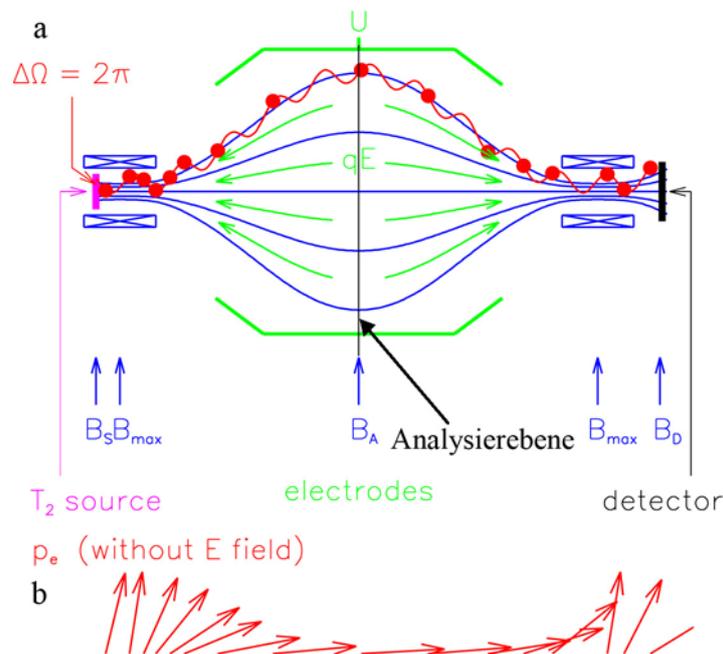
**Abbildung 2.2: Resultate bisherige  $^3\text{H}$  Zerfallsexperimente**

Alle Experimente außer Mainz und Troitsk benutzen magnetische Spektrometer. Mainz und Troitsk benutzten elektrostatische Spektrometer vom MAC-E Typ [KAT04].

Auch bei KATRIN, einem Tritiumzerfallsexperiment der neuesten Generation, finden sich diese Komponenten wieder. In den Kapiteln 2.5 sowie 2.6 werden diese näher betrachtet. Im folgenden Kapitel wird das MAC-E Filterprinzip zuvor noch näher erläutert.

### 2.3 Das MAC-E Filterprinzip

Das Design basiert auf einem Vorschlag von P. Kruit [Kru83] und wurde erstmals von den Gruppen in Troitsk und Mainz eingesetzt. Ein MAC-E Filter (**M**agnetic **A**diabatic **C**ollimation combined with an **E**lectrostatic Filter) verbindet die zwei wichtigen Eigenschaften einer hohen Luminosität mit einer sehr guten Energieauflösung. Abbildung 2.3 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Filters. Zwei supraleitende Magnete erzeugen das Führungsfeld. Filter dieses Typs besitzen einen maximalen Akzeptanzwinkel von  $2\pi$ . Um die Flusslinien herum vollführen die Elektronen Zyklotronbahnen bei ihrem Flug durch das Spektrometer. In der Mitte des Spektrometers befindet sich die Analysierebene, bis zu welcher die Stärke des erzeugten Magnetfeldes um mehrere Größenordnungen abnimmt. Dabei wird durch die aufgrund des magnetischen Gradienten erzeugte Kraft fast die gesamte Zyklotronenergie in longitudinalen (entlang der Spektrometerachse) Impuls umgewandelt. Der Impuls wird adiabatisch transformiert, da sich die Stärke des Magnetfeldes nur langsam ändert.



**Abbildung 2.3: Prinzip eines MAC-E Filters.**

Von links aus der Quelle kommende und in das Spektrometer eintretende Elektronen, werden auf Zyklotronbahnen entlang der magnetischen Flusslinien geführt. Das von den beiden supraleitenden Magneten am linken sowie rechten Ende des Spektrometers aufgespannte Magnetfeld ändert sich dabei um mehrere Größenordnungen. Dadurch wird bis zur Analysierebene in der Mitte des Spektrometers der überwiegende Teil der Zyklotronenergie in longitudinale Bewegungsenergie umgewandelt. Das an den Elektroden anliegende Potential  $U$  formt ein Gegenfeld, welches Elektronen reflektiert, deren Energie nicht ausreicht, um den Potentialberg zu überwinden. Die Pfeile in b) geben die Impulstransformation wieder.

Dies führt dazu, dass das magnetische Moment  $\mu$  in nichtrelativistischer Näherung konstant bleibt.

$$\mu = \frac{E_{\perp}}{B} = \text{const.} \quad (2.5)$$

Zusammenfassend kann man daher sagen, dass Elektronen, welche isotrop von der Quelle emittiert werden, im Spektrometer in einen breiten, nahezu parallelen Strahl transformiert werden, welcher parallel zu den magnetischen Feldlinien ausgerichtet ist. Dieser Strahl läuft gegen ein elektrostatisches Potential an, welches durch zylindrische Elektroden geformt wird. Besitzt ein Elektron nun eine genügend hohe Energie, so kann es die Analysierebene (Punkte des höchsten Potentials, Abbildung 2.3) überwinden und wird danach wieder beschleunigt und refokussiert, um im Detektor (rechts in Abbildung 2.3) nachgewiesen zu werden. Alle Elektronen, welche die Analysierebene nicht überwinden können, werden reflektiert.

Das Spektrometer arbeitet daher als ein integrierender Hochenergiepass-Filter. Die relative Schärfe des Filters ist ausschließlich aus dem Verhältnis des

minimalen Feldes in der Analysierebene  $B_A$  zu  $B_{\max}$  gegeben, welches proportional zu den geometrischen Verhältnissen (Flusserhaltung) ist

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{B_A}{B_{\max}} = \frac{A_{\min}}{A_A} \quad (2.6)$$

wobei der Index „A“ für die Größe in der Analysierebene steht.

Dies bedeutet, dass durch die Veränderung des Retardierungspotentials das  $\beta$ -Spektrum vermessen werden kann.

Des Weiteren ist die Elektronenquelle ebenfalls in einem B-Feld der Stärke  $B_{\text{Quelle}}$  platziert, welches kleiner als  $B_{\max}$  ist. Durch diese Maßnahme werden Elektronen unterdrückt, deren Startwinkel (Akzeptanzwinkel) größer ist als

$$\sin \theta = \sqrt{\frac{B_{\text{Quelle}}}{B_{\max}}}. \quad (2.7)$$

Die Elektronen werden durch das B-Feld auf Kreisbahnen gezwungen. Wird ein Elektron unter einem großen Winkel emittiert, so besitzt diese Kreisbahn eine kleinere Steigung als es bei einem kleinen Startwinkel der Fall ist. Eine kleinere Steigung resultiert bei gleicher Strecke entlang einer Achse aber in einem insgesamt längeren Weg. Dies führt zu potentiell mehr Streuungen als bei Elektronen mit einem kleinen Startwinkel die damit eine große Steigung erfahren.

Obwohl es sich beim MAC-E Filter gegenüber rein magnetischen Filtern um einen sehr leistungsfähigen Aufbau handelt, kann es in manchen Situationen besser sein, einen nicht-integrierenden Filter zu verwenden.

Nach [Bon99] existiert die Möglichkeit, das MAC-E Filter in einem Time-of-Flight (ToF) Modus zu betreiben (Bandpass). Die Elektronen im ausgewählten Energiebereich besitzen Energien in der Größenordnung des Retardierungspotentials, bewegen sich also relativ langsam. Misst man nun die Flugzeit der interessierenden Elektronen, so kann man dadurch diese von den höherenergetischen unterscheiden. Somit wird der normale MAC-E Filter, welcher ein Hochpass-Filter darstellt, zu einem Bandpassfilter gleicher Energieauflösung und nahezu identischer Luminosität.

## 2.4 Die Anforderungen an KATRIN

Will man eine Sensitivität von 0,2 eV in drei Jahren reiner Messzeit erreichen, dann ergeben sich verschiedene Anforderungen für ein neues Neutrinomassenexperiment.

Folgende Anforderungen sind zu erfüllen [KAT04]:

- ♦ Hohe Zählrate  $S$  im Endpunktsbereich, da das Energieintervall im Endpunktsbereich ( $E_0-E$ ) proportional zum angestrebten Wert für die Neutrinomasse und damit kleiner bei höherer Sensitivität wird.
- ♦ Hohe Energieauflösung  $E/\Delta E \approx 20000$  des Spektrometers. Um eine Sensitivität auf  $m_\nu \approx 0,2$  eV zu erhalten, ist ein  $\Delta E \approx 1$  eV im Endbereich notwendig.
- ♦ Reduzierung des Untergrunds auf  $\approx 1$  mHz im Endpunktsbereich.
- ♦ Reduzierung systematischer Fehler auf  $m_\nu^2 c^4$  um einen Faktor  $10^2$  (bezogen auf die Vorgängerexperimente in Mainz und Troitsk) auf etwa  $\pm 20$  meV<sup>2</sup>.

Dies erreicht man durch folgende Maßnahmen [KAT04]:

- ♦ Die Fläche der Analysierebene  $A_A$  muss so groß wie möglich gewählt werden, um die erforderlichen Verbesserungen in der Energieauflösung sowie die Signalrate im Endpunktsbereich zu erhalten.
- ♦ Um eine möglichst hohe Zählrate zu erreichen, muss die Reinheit des in der Quelle verwendeten Tritiums so hoch wie möglich sein.
- ♦ Die Säulendichte  $\rho d$  in der Quelle sollte so groß sein, dass zum einen eine ausreichend hohe Luminosität erreicht wird. Zum Anderen darf die Dichte jedoch nicht so hoch sein, dass die systematischen Unsicherheiten aufgrund von Streuung von Elektronen an Tritiummolekülen stark ansteigen. Dies würde nicht mehr zu einer weiteren Erhöhung der Signalrate beitragen. Berechnungen haben gezeigt, dass eine Säulendichte von  $5 \cdot 10^{17}$  Moleküle/cm<sup>2</sup> einen guten Kompromiss darstellt.

Dies alles führt zu folgenden Designkriterien von KATRIN [KAT04]:

- ♦  $B_A = 3 \cdot 10^{-4}$  T,  $B_{\max} = 6$  T im Normalbetrieb. Höhere Magnetfeldstärken würden zu erhöhten technischen Schwierigkeiten führen. Dies spiegelt die Forderung von  $E/\Delta E \approx 20000$  wider.
- ♦ Ein technisch machbarer Durchmesser des Hauptspektrometers beträgt ca. 10 m. Dies führt zu einer Fläche in der Analysierebene von  $A_A \approx 64$  m<sup>2</sup>.
- ♦ Der magnetische Fluss von der Quelle bis zum Spektrometer beträgt mit den ersten beiden Punkten  $\Phi = \int B dA = B_A \cdot A_A = 191$  Tcm<sup>2</sup>.

- ♦ Das Magnetfeld der Quelle  $B_S$  sollte niedriger sein als  $B_{\max}$ , um Elektronen mit großen Streuwinkeln zu entfernen. Mit  $\rho d = 5 \cdot 10^{17}$  Moleküle/cm<sup>2</sup> und einem Feld  $B_S = 3,6$  T erhält man  $\theta = 51^\circ$  (Gl. (2.7)).
- ♦ Die Verwendung von Tritium mit einer Reinheit von >95% reicht aus, um eine hohe Luminosität der Quelle zu gewährleisten. Das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) ist im Stande, diese Tritiumreinheit zu gewährleisten [TLK05].

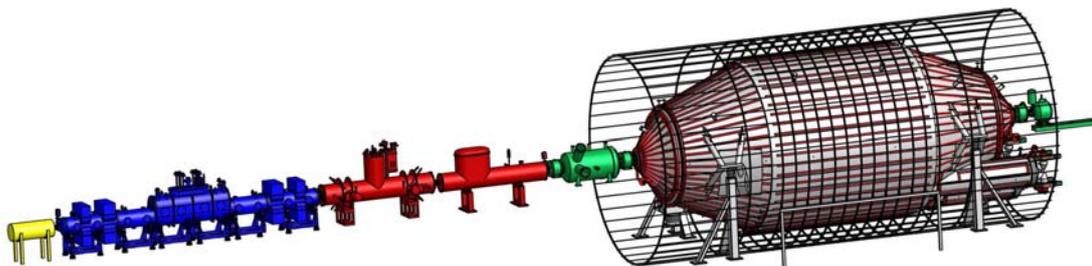
Diese Kriterien ergeben im Vergleich zu den Experimenten in Mainz und Troitsk folgende Verbesserungen [KAT04]:

- ♦ Faktor 5 in Energieauflösung
- ♦ Faktor 40 in der effektiven Quellfläche
- ♦ Faktor 1,4 in der Tritiumreinheit
- ♦ Faktor 2 in der effektiven Säulendichte  $\rho d$

Insgesamt erhält man dadurch eine Verbesserung in der Signalrate um einen Faktor 100.

In den folgenden Kapiteln 2.5 und 2.6 wird auf die technische Umsetzung dieser Forderungen anhand der einzelnen Sektionen eingegangen. Kapitel 2.5 geht dabei auf die sogenannte Quell- und Transportsektion (STS, source and transport system), also den Tritium führenden Bereich ein, während sich Kapitel 2.6 mit dem Vor- und Hauptspektrometer sowie dem Detektor beschäftigt.

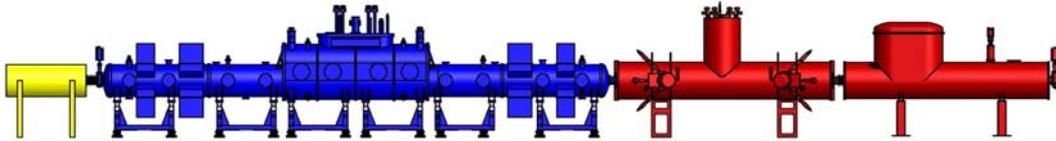
Abbildung 2.4 zeigt den gesamten Aufbau von KATRIN.



**Abbildung 2.4: KATRIN Gesamtexperimentaufbau.**

Abgebildet ist das ca. 70m lange Gesamtexperimentaufbau bestehend aus (von links) rückwärtigem Nachweissystem, WGTS, Transportstrecke DPS2-F und CPS, den Spektrometern sowie dem Detektor. Die Gesamtlänge beträgt ca. 70 m.

## 2.5 Das Quell- und Transportsystem von KATRIN (STS)



**Abbildung 2.5: Quell- und Transportstrecke.**

Abgebildet sind die Komponenten der Transportsektion. Links das rückwärtige System (gelb). Die differentielle Pumpstrecken DPS1-R und DPS1-F sind dabei Teil des eigentlichen Quellrohres WGTS (blau). Rechts schließt sich die differentielle Pumpstrecke DPS2-F und kryogene Pumpstrecke CPS an (rot).

In Abbildung 2.5 sind die Komponenten des Quell- und Transportsystems dargestellt. Diese Komponenten liegen im Inneren des Tritiumlabors Karlsruhe (TLK), da WGTS, rückwärtiges System und DPS2-F sowie CPS in Kontakt mit Tritium kommen.

Der durch Tritiumzerfälle erzeugte Untergrund in den Spektrometern darf nicht höher als  $10^{-3}$  Ereignisse/Sekunde betragen. Dies führt zu einem Tritiumpartialdruck von  $<10^{-20}$  mbar und zu einer maximal erlaubten Tritiumflussrate zum Vorspektrometer von  $10^{-14}$  mbar·l/s. Basierend auf einer Einlassrate von 2 mbar·l/s wird also ein Gesamtreduktionsfaktor von  $10^{14}$  benötigt [KAT04].

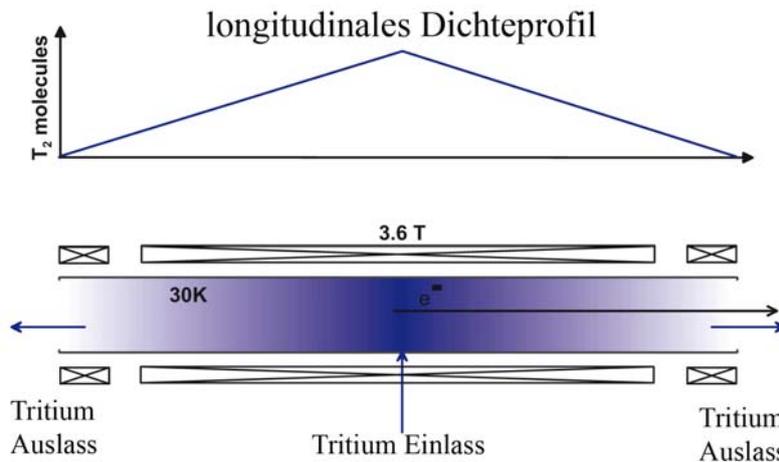
In diesem Abschnitt soll eine kurze Einführung in die Systeme der Quell- und Transportsektion gegeben werden. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf dem in Kapitel 3 beschriebenen Handschuhboxenteil.

### 2.5.1 Die fensterlose gasförmige Tritiumquelle WGTS

Wie im Kapitel 2.4 besprochen wurde, benötigt die physikalische Quelle (WGTS, windowless gaseous tritium source) eine Tritiumgassäule mit einer Säulendichte von  $\rho d = 5 \cdot 10^{17}$  Moleküle/cm<sup>2</sup> bei einem Durchmesser von 82 mm, einer Länge von 10 m und einem Magnetfeld zur adiabatischen Führung der  $\beta$ -Zerfallselektronen. Schematisch ist dies in Abbildung 2.6 dargestellt. Darin ist oben das sich einstellende Dichteprofil entlang der Achse dargestellt. Die Säulendichte muss dabei besser als auf 0,1 % stabil stehen, um systematische Fehler zu minimieren.

Um diese Anforderungen technisch zu realisieren, benötigt man mehrere Einzelkomponenten:

- ♦ Mehrere Tritiumkreisläufe (Kapitel 3), welche eine kontinuierliche und äußerst konstante Einspeisung von Tritiumgas in der Mitte der Gassäule



**Abbildung 2.6: Dichteprofil in der WGTS Quelle.**

Dargestellt ist oben das sich einstellende Dichteprofil der Gassäule über die Länge von 10 m. Im unteren Teil der Abbildung ist die Platzierung der Magnete des WGTS-Kryostaten sowie die Position des Tritiumeinlasses zu erkennen.

über eine Kapillare ermöglichen (Abbildung 2.6 unten). Außerdem stellen diese Tritiumkreisläufe die erforderliche hohe Reinheit des Tritiumgases sicher. Zu beiden Enden des Quellrohres erfolgt über Turbomolekularpumpen ein Abpumpen von Tritium in die Tritiumkreisläufe (DPS1-R und DPS1-F). Dadurch entsteht zwischen Ein- und Auslass ein Dichtegefälle von einem Faktor 100.

- ♦ Um den adiabatischen Transport der Zerfallselektronen zu gewährleisten, wird das die Gassäule umschließende Rohr (Quellrohr) in einem durch supraleitende Magnete erzeugten Magnetfeld mit einer Stärke von 3,6 T platziert. Um die systematischen Fehler zu minimieren ist es notwendig, die Säulendichte von  $\rho d = 5 \cdot 10^{17}$  Moleküle/cm<sup>2</sup> auf einem Niveau von 0,1% konstant zu halten. Dies erreicht man durch eine Stabilisierung des Einlassdrucks und einer Temperaturstabilisierung des Quellrohres auf etwa 30 K bei einer Genauigkeit <0,1%. Die Temperaturstabilisierung ihrerseits wird durch ein kompliziertes zwei-Phasen-Neon Kühlsystem erreicht, bei welchem man die Temperatur über den Dampfdruck des Neons einstellen kann [Gro08]. Das die Gassäule umschließende Rohr, das Magnetsystem und das Kühlsystem bilden zusammen den WGTS-Kryostaten, welcher derzeit bei Accel gefertigt wird.

## 2.5.2 Die Differentielle Pumpstrecke DPS2-F

Die DPS2-F (differential pumping section 2-forward) besitzt als Teil des Transportsystems zwei Aufgaben:

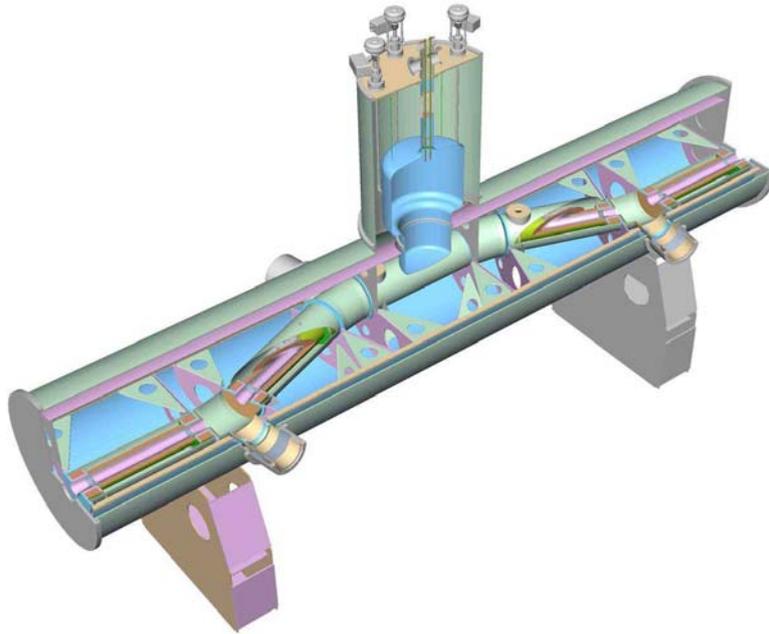
- ♦ Die erste ist es, die in der WGTS entstandenen  $\beta$ -Zerfallselektronen adiabatisch in Richtung Spektrometer zu transportieren.
- ♦ Die zweite Aufgabe besteht in der Reduktion des Tritiumflusses um einen Faktor in der Größenordnung von  $10^5$ .

Der erste Punkt wird, wie auch schon in der WGTS realisiert, durch Magnetfelder mit einer maximalen Stärke von 5,6 T erreicht, welche mit Hilfe von supraleitenden Magneten erzeugt werden. Die Magnete sind dabei so angeordnet, dass die Elektronen auf einer, eine Schikane beschreibenden, Bahn geleitet werden. Das minimale Feld zwischen zwei Segmenten beträgt ca. 0,5 T. Die geometrische Anordnung des Strahlrohres entspricht natürlich dieser Bahn. Dadurch besteht die DPS2-F aus insgesamt fünf je 1 m langen Einzelsegmenten, welche unter einem Winkel von  $15^\circ$  zueinander angeordnet sind. Die Betriebstemperatur liegt bei ca. 80 K.

Die zweite Anforderung, die Flussreduktion um einen Faktor  $10^5$ , erreicht man durch eine differentielle Anordnung von vier Turbomolekularpumpen mit einem Tritiumreduktionsfaktor von 20-30 je Pumpe. Durch die gewinkelte Anordnung des Strahlrohres wird gewährleistet, dass der Elektronen-/Tritiumstrahl keine durchgehende Sichtline bis zum Spektrometer hat. Jede Pumpe besitzt ein Pumpvermögen von  $\approx 2000$  l/s (bezogen auf  $N_2$ ) und ist zwischen einem Strahlrohrsegment angebracht, wie aus Abbildung 2.7 ersichtlich ist.

Gebaut wurde die DPS2-F bei der Firma ASG und im Sommer 2009 an das Forschungszentrum geliefert. Derzeit erfolgt der Anschluss an sämtliche Versorgungssysteme gefolgt von Testmessungen. Abbildung 2.8 zeigt die DPS2-F bei der Ankunft am FZK.

Durch das aktive Pumpen der Turbomolekularpumpen der DPS1-F ( $10^2$ ) und DPS2-F ( $10^5$ ) wird ein Tritiumreduktionsfaktor von  $10^7$  und ein Restdruck von ca.  $10^{-10}$  mbar erreicht, wodurch die Grenze durch mechanisches Pumpen erreicht ist. Eine weitere Reduktion des Druckes ist nur noch durch Gas bindende Pumpen möglich, dies erfolgt in der CPS (Kapitel 2.5.3).



**Abbildung 2.7: 3-D Ansicht der DPS2-F**

Zu erkennen sind die fünf je 1m langen Sektionen sowie die dazwischen liegenden vier Pumpports für Turbomolekularpumpen. Der Gesamtreduktionsfaktor der DPS2-F liegt bei  $10^5$  [KAT04].



**Abbildung 2.8: DPS2-F bei der Ankunft am Forschungszentrum.**

Gezeigt ist die DPS2-F, welche gerade vom LKW in die KATRIN-Transporthalle gehoben wird.

### 2.5.3 Die kryogene Pumpstrecke CPS

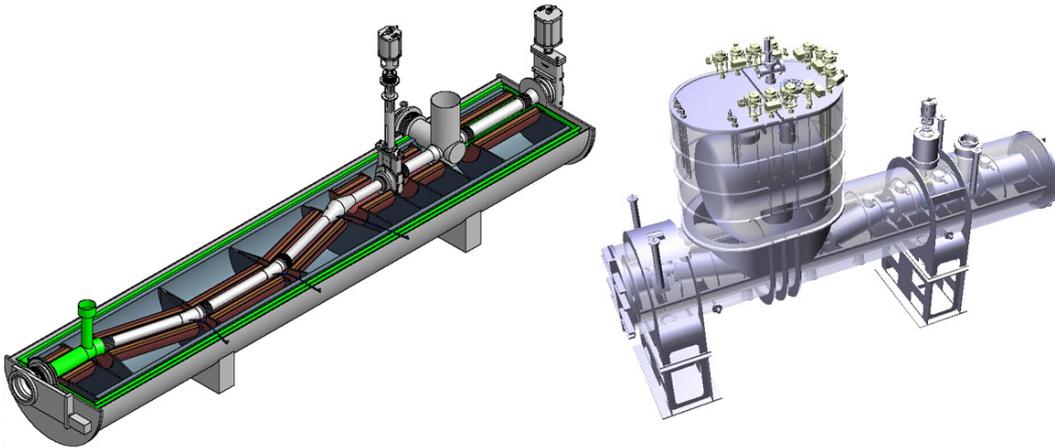
Die Forderung einer Tritiumflussreduktion um einen Faktor  $10^{14}$  von Quelle bis Vorspektrometer kann alleine mit den mechanischen Pumpstrecken DPS1-F und DPS2-F nicht erfüllt werden. Bis zum Eintrittsflansch der CPS (**cryogenic pumping section**) wurde der Fluss um einen Faktor  $10^7$  reduziert. Eine weitere Reduzierung um einen Faktor  $10^7$  ist also noch notwendig. Hier kommt das Verfahren der Kryosorption (Bindung an kryogene Oberflächen) zum Einsatz. Außerdem muss auch in diesem Teil der Transportsektion eine adiabatische Führung der Elektronen gewährleistet sein.

Wie schon bei der DPS2-F kommt auch in der CPS aus dem gleichen Grund ein gewinkeltes Strahlrohr zum Einsatz (Abbildung 2.9). Um die adiabatische Führung zu gewährleisten, befindet sich das Strahlrohr mit einem Durchmesser von 75mm bei der CPS analog zur DPS und WGTS ebenfalls in einem homogenen Magnetfeld der Stärke 5,6 T, erzeugt durch supraleitende Spulen. Diese umschließen das Strahlrohr, welches innen mit einer dünnen (1-2 $\mu$ m) Schicht aus aufgefrorenem Argon beschichtet ist. In die CPS geleitetes Argongas friert dabei an dem heliumkalten (4.5 K) Strahlrohr fest. Es wird erwartet, dass pro Tag etwa  $10^{17}$  Tritiummoleküle daran eingefangen werden. Um die erforderlichen, niedrigen Temperaturen zu erreichen, ist das Magnetsystem zusammen mit dem Strahlrohr in einen Kryostaten eingebettet. Dieser wird zurzeit bei ASG gefertigt und soll 2010 geliefert werden. Nach einem KATRIN-Run (ca. 60 Tage) wird das Strahlrohr erwärmt, um den Argonschnee samt angefrorenem Tritium zu entfernen. Dabei wird von der Spektrometerseite aus ein kontinuierlicher Strom von Heliumgas aufrecht gehalten („purging“) um eine Kontamination des spektrometerseitigen Teils CPS (und damit später der Spektrometer) zu verhindern. Abbildung 2.9 zeigt einen Schnitt durch den Kryostaten sowie eine Zusammenbauzeichnung des Systems.

Die Funktionsfähigkeit des Prinzips wurde im Rahmen des Testexperiments TRAP (**tritium argon frost pump**) im Tritiumlabor Karlsruhe demonstriert ([Eic08], [Stu07]).

### 2.5.4 Das rückwärtige System

Das rückwärtige System besteht aus einem Kalibrations- und Überwachungssystem (CMS: **calibration and monitoring system**) und schließt sich an dem Spektrometer abgewandten Ende der WGTS an. Es beinhaltet unter anderem eine Elektronenkanone, um einen Fluss von  $\beta$ -Elektronen in der WGTS zu simulieren und die systematischen Eigenschaften der Quelle zu bestimmen. Daneben wird auch ein Monitordetektor im rückwärtigen System untergebracht sein, um eine Kontrolle der Zerfallelektronen in der WGTS zu ermöglichen.



**Abbildung 2.9: Kryogene Pumpstrecke CPS**

Dargestellt ist links ein Schnitt durch die CPS mit Strahlrohr. Rechts ist eine Abbildung des sich momentan im Bau befindlichen Kryostaten.

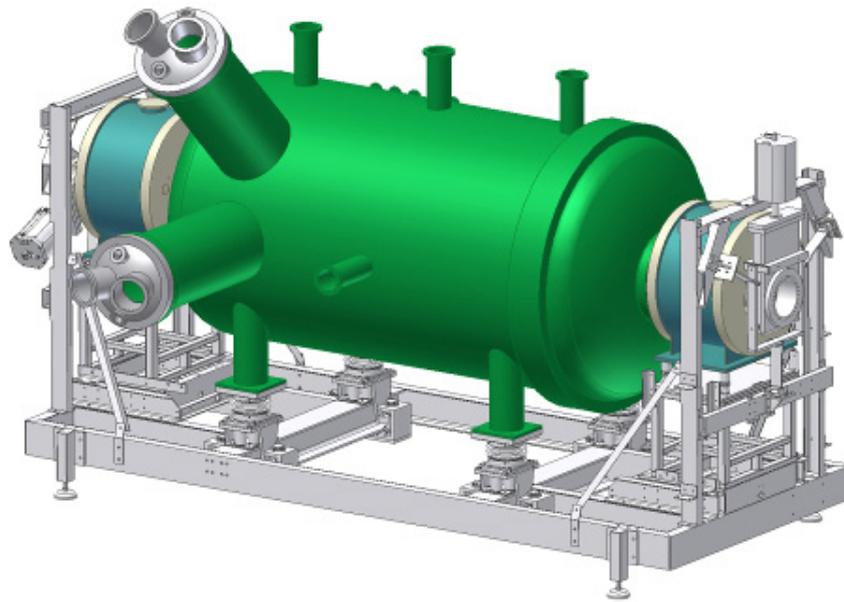
## 2.6 Spektrometer und Nachweissystem

Das Hauptspektrometer dient, wie bereits erwähnt, zur Selektion der durch  $\beta$ -Zerfall entstehenden Elektronen mittels MAC-E Filterprinzip (siehe Kapitel 2.3). Es wird dazu ein Ultrahochvakuum (UHV) mit einem Enddruck  $p < 10^{-11}$  mbar angestrebt. Aufgrund der großen Oberflächen von insgesamt ca. 650 m<sup>2</sup> wird zur Aufrechterhaltung des Vakuums eine Pumpleistung von 10<sup>5</sup> l/s für Wasserstoff benötigt. Dies wird zum größten Teil für Wasserstoff durch Getterpumpen [Jou08] erledigt. Andere Gase, wie Helium und Methan werden mit Hilfe von Turbomolekularpumpen (TMP) entfernt.

Bei KATRIN kommt ein Tandemspektrometer-System zum Einsatz. Das bedeutet, dass ein Spektrometer (das Vorspektrometer) dem eigentlichen Spektrometer vorgeschaltet ist.

### 2.6.1 Das Vorspektrometer

Im Vorspektrometer wird eine Vorfilterung der Elektronen durchgeführt [Bor06]. Diese Maßnahme dient dazu, die Untergrundbeiträge durch Ionisation von Restgas im Hauptspektrometer zu verringern. Dabei bedient es sich ebenfalls des MAC-E Filterprinzips. Es können nur Elektronen passieren, deren Energie knapp unterhalb von 18,6 keV (dem Endpunkt des Tritiumspektrums) liegt.



**Abbildung 2.10: Vorspektrometer**

Zu sehen ist eine 3D Ansicht des Vorspektrometers in der aktuellen Konfiguration.

Der Unterdrückungsfaktor des  $\beta$ -Elektronenflusses durch das Vorspektrometer liegt bei  $10^7$ .

Daneben dient das Vorspektrometer als Testbett für Technologien, welche auch im Hauptspektrometer zum Einsatz kommen sollen, wie z.B. das innere Elektrodensystem oder die NEG-Pumpen-Technologie.

Es handelt sich beim Vorspektrometer um einen zylindrischen Tank mit einer Länge von 3,4 m und einem Durchmesser von 1,7 m. Die äußere Hülle wird im Betrieb auf -18,6 kV gelegt. Die innere Elektrode befindet sich auf einem etwas höheren, negativen Potential und dient zur Formung des Retardierungspotentials. Daneben werden Elektronen, welche z.B. durch das Auftreffen kosmischer Myonen auf die Hülle des Spektrometers in dessen Inneres emittiert werden, reflektiert. Diese Maßnahme dient ebenfalls der Reduzierung des Untergrunds. Der Betriebsdruck des Vorspektrometers liegt bei  $p < 10^{-11}$  mbar.

## 2.6.2 Das Hauptspektrometer

Aufgabe des Hauptspektrometers ist die präzise energetische Filterung der durch den  $\beta$ -Zerfall entstandenen Elektronen in der WGTS, um diese dann im Anschluss auf dem Detektorsystem nachweisen zu können. Erreicht wird dies durch einen Filter vom MAC-E Typ (Kapitel 2.3).

Das in Abbildung 2.11 gezeigte Hauptspektrometer besteht unter anderem aus einem ca. 1250 m<sup>3</sup> großen Ultrahochvakuum (UHV) Tank von ca. 10 m Durchmesser und ca. 23 m Länge. Es wurden bezüglich der Materialauswahl hohe Anforderungen gestellt. Der Stahl darf eine gewisse Restradioaktivität nicht übersteigen, um den Untergrund gering zu halten. Außerdem muss eine hinreichende Festigkeit sowie nicht-magnetisches Verhalten gegeben sein. Die Anforderungen erfüllt der Edelstahl 1.4429 [KAT04]. Nach dem eigentlichen Bau müssen noch spezielle Arbeitsschritte wie Reinigung und Elektropolieren auf der gesamten Innenfläche durchgeführt werden.

Zur Erzeugung des UHV's dienen sechs Turbomolekularpumpen des Herstellers Oerlikon-Leybold vom Typ MAG-2800, welche an zwei Pumpports angeflanscht werden. Außerdem werden am Tank ca. 90 m<sup>2</sup> NEG-Getterstreifen (NEG= non evaporable getter) [Lou07] angebracht, welche vornehmlich Wasserstoffisotope binden, um damit das erforderliche UHV von  $< 10^{-11}$  mbar zu erreichen.

Weitere Komponenten des Hauptspektrometers sind zwei supraleitende Magnete, welche das notwendige B-Feld an beiden Enden des Hauptspektrometertanks erzeugen. Der Flussschlauch von 191 T/cm<sup>2</sup> dieses hochgradig inhomogenen B-Feldes dehnt sich bis zu einem Durchmesser von 9 m in der Analysierebene aus. Es wird dort eine Stärke von  $3 \cdot 10^{-4}$  T besitzen (Kapitel 2.4).

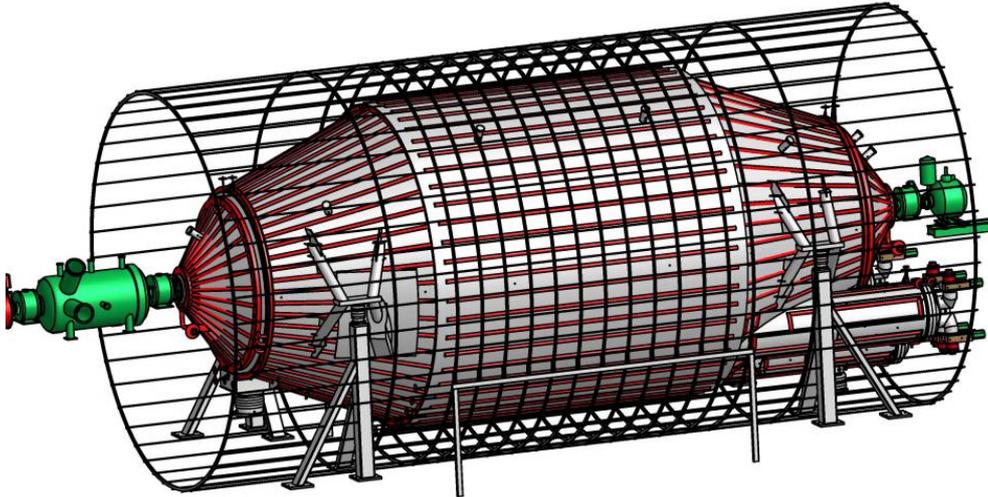
Der Hauptspektrometertank selbst wird auf ein variables Potential von -18,5...-18,7 kV gelegt. Dazu wird eine passende Hochspannungs-Versorgung benötigt, welche im Stande ist, die benötigte Spannung äußerst stabil zu liefern. Zu diesem Zweck wurde in Kooperation mit der PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt Braunschweig) ein eigener Präzisionsspannungsteiler entwickelt [Thu07].

Zur Abschirmung von Elektronen, welche z.B. durch kosmische Myonen aus der Wand des Spektrometertanks herausgeschlagen werden, dient ein im Innern des Tanks installiertes Elektrodensystem. Da dieses auf einem etwas größeren, negativen Potential als der Tank selbst liegt, werden Elektronen daran reflektiert und können nicht weiter in das Innere vordringen. Daneben erlaubt das innere Elektrodensystem eine genaue Formung des elektrischen Feldes im Spektrometertank. Realisiert ist dieses System in Form von ca. 25000 Einzeldrähten, welche in mehrere Module zusammengefasst und mittels eines Schienensystems im Tank befestigt werden (Abbildung 2.12) [Val06].

Die letzte Hauptkomponente des Hauptspektrometersystems bildet das äußere Luftspulensystem. Dieses besteht aus 10 Helmholtzspulenpaare (konzentrisch zur Spektromerachse) sowie mehreren Stäben (parallel zur Spektrometerachse). Die parallelen Komponenten des Luftspulensystems dienen zur Kompensation des Erdmagnetfeldes, welches ohne Kompensation zu einer Störung der radialen Symmetrie der Elektronenverteilung führen und den Hintergrund erhöhen würde. Die konzentrischen Komponenten dienen zur Feldformung des durch die supra-

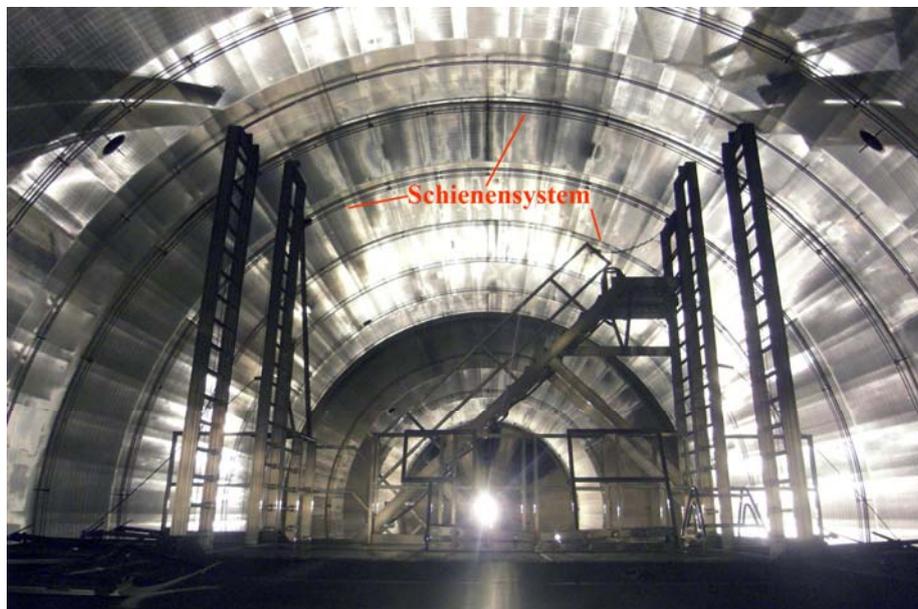
leitenden Magnete erzeugten Magnetfeldes. Ohne die konzentrischen Komponenten des Luftspulensystems würde der Flusschlauch von  $191 \text{ Tcm}^2$  nach außen treten und somit  $\beta$ -Elektronen in der Tankhülle verloren gehen.

Hergestellt wurde der Hauptspektrometertank bei MAN in Deggendorf.



**Abbildung 2.11: 3D Außenansicht des Hauptspektrometers mit Luftspulensystem.**

Zu sehen ist das Hauptspektrometer (23,3 m Länge, 10 m Durchmesser) mit Luftspulensystem zur Kompensation des Erdmagnetfeldes und Feldformung. Links befindet sich das Vorspektrometer, rechts der Detektor.



**Abbildung 2.12: Blick in den KATRIN Hauptspektrometertank.**

Zu sehen ist das Innere des Hauptspektrometertanks mit dem installierten Schienensystem zur zukünftigen Aufnahme der inneren Drahtelektroden. Im Vordergrund befindet sich die Arbeitsbühne zur Montage des Elektroden- und Schienensystems. Sämtliche Arbeiten finden unter strengen Reinraumbedingungen statt.

### 2.6.3 Der Detektor

Nach dem Passieren der Analysierebene werden die Elektronen wieder auf ihre ursprüngliche Energie beschleunigt und durch das B-Feld erneut gebündelt. Der Nachweis findet auf dem Detektor statt. Eine verkleinerte Version wurde bereits für das Vorspektrometer entworfen und gebaut [Arm06]. Im Referenzdesign für den Hauptdetektor wird eine segmentierte PIN Diode mit 148 Segmenten vorgeschlagen.

Anforderungen an den Detektor sind [KAT04]:

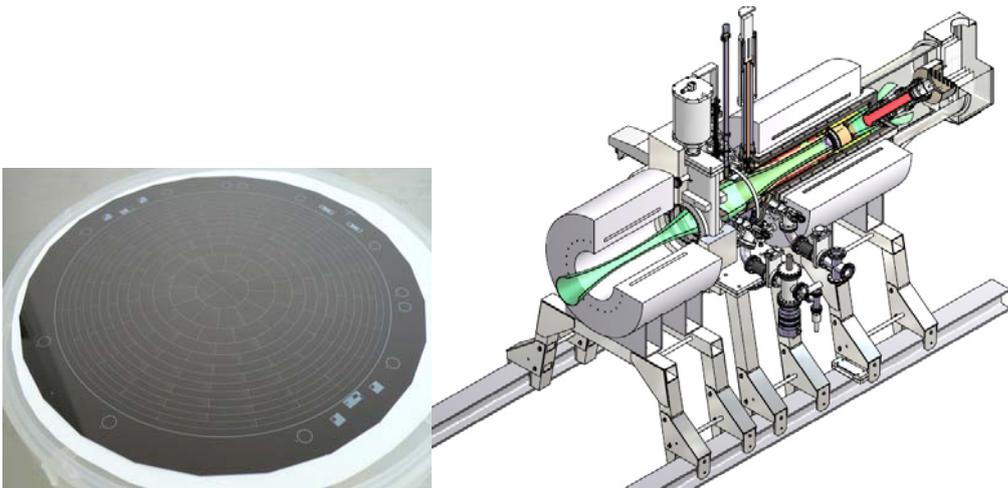
- ◆ Nachweis der Elektronen aus dem Tritiumzerfall bis 18,6 keV.
- ◆ Nachweiseffizienz für Elektronen  $\varepsilon > 0,9$ .
- ◆ Energieauflösung  $\Delta E < 600$  eV.
- ◆ Rauschunterdrückung durch aktive und passive Abschirmung.
- ◆ Zeitauflösung  $\Delta t < 0,5$   $\mu$ s.
- ◆ Verarbeitung hoher Zählraten der Elektronenkanone ( $>100$  kHz).

Der Detektor wird nicht direkt an das Hauptspektrometer angebracht, da dann zur Wartung des Detektors gleichzeitig das UHV des Spektrometers zerstört werden würde. Daher befindet sich zwischen Detektor und Spektrometer ein zusätzliches Ventil. Da der Detektor damit aber aus der Fokalebene des Magneten des Hauptspektrometers heraus rückt, ist ein weiterer Magnet notwendig, um den kompletten Flusschlauch von  $191 \text{ Tcm}^2$  auf den Detektor abzubilden.

Abbildung 2.13 zeigt links den Prototypen des Siliziumdetektors. Gut zu erkennen ist die Segmentierung. Rechts ist eine 3D Ansicht des gesamten Aufbaus dargestellt. Darin grün eingezeichnet ist der resultierende Flusschlauch, in gelb ist der Detektor zu erkennen.

Neben dem Magnetsystem und dem eigentlichen Detektor beinhaltet das System noch Komponenten zur Kühlung des Si-Detektors, was der Verminderung von Rauschen dient.

Eine erste Prüfung des am MIT in den USA entwickelten und hergestellten Prototyps soll Anfang 2010 statt finden und bis Ende 2010 abgeschlossen sein.



**Abbildung 2.13: Prototyp des Detektors (links) und 3D Ansicht (rechts)**

Links zu sehen ist der Prototyp des Detektors. Es handelt sich dabei um eine segmentierte PIN Diode mit 148 Segmenten zu je  $42 \text{ mm}^2$  und einem Gesamtdurchmesser von ca. 10 cm. Rechts ist eine 3D Ansicht der gesamten Einheit dargestellt [Doe08].

## 3. Die Tritiumkreisläufe im Tritiumlabor Karlsruhe

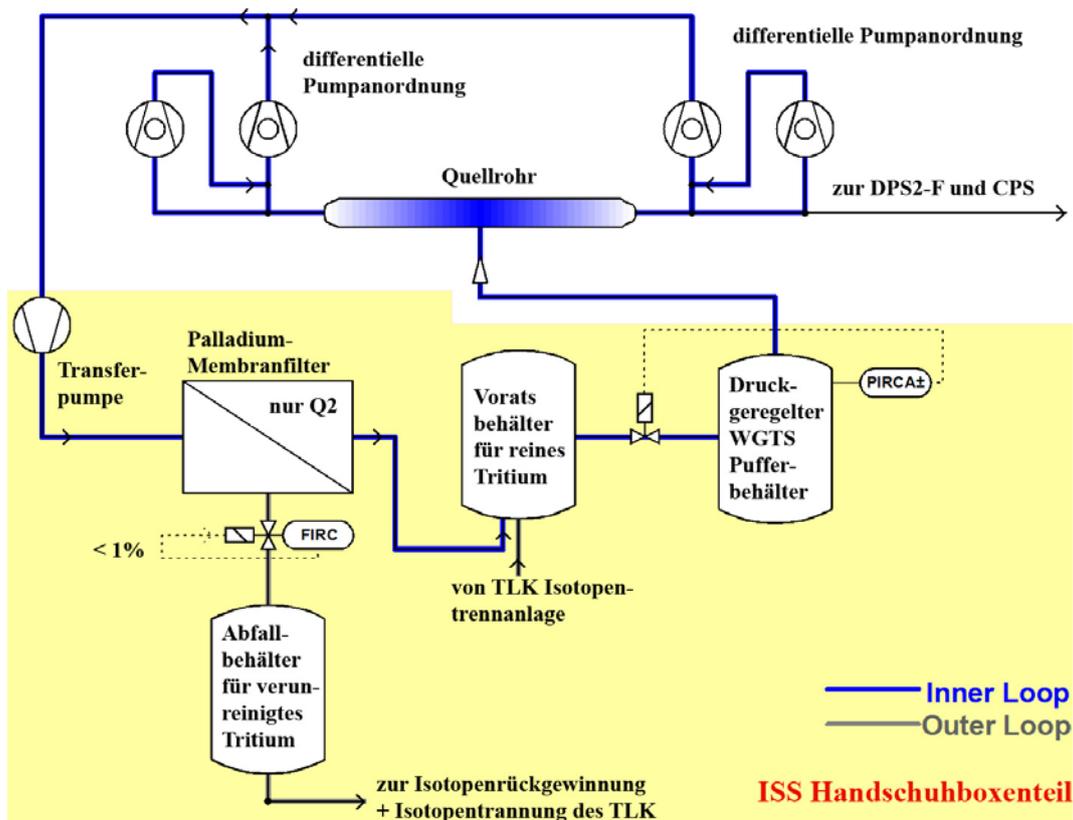
In diesem Kapitel werden zuerst die Anforderungen an das Tritiuminjektionssystem „Inner Loop“ dargelegt. Der Handschuhboxenteil dieses Systems bildet thematisch den Schwerpunkt dieser Arbeit. Im Anschluss daran soll in Kapitel 3.2 gezeigt werden, mit welchen Methoden dies erreicht werden soll, gefolgt von einem kurzen Überblick über die Einrichtungen und Möglichkeiten des Tritiumlabor Karlsruhe (TLK), in welchem der Inner Loop aufgebaut wird. Nachdem in Kapitel 3.3 eine kurze Beschreibung über die Funktionsweise des Inner Loop gegeben wurde, beschäftigt sich Kapitel 3.4 mit den wichtigsten Komponenten des Aufbaus und gibt einen kurz gefassten Einblick in das verwendete Prozessleitsystem. Abschließend soll Kapitel 3.5 noch einen Einblick in die zu erfüllenden Qualitätssicherungsmaßnahmen gewähren.

### 3.1 Physikalische Anforderungen und Designkriterien

In Kapitel 2.4 „Die Anforderungen an KATRIN“ wurden bereits die wichtigsten Anforderungen an den KATRIN Aufbau gezeigt. An dieser Stelle sollen nun die speziellen Anforderungen an die Tritiumkreisläufe und hierbei vornehmlich an den Inner Loop kurz diskutiert werden.

Der Tritiumkreislauf des Inner Loop soll:

- ♦ in der Quelle (WGTS) eine Säulendichte  $\rho d$  von  $5 \cdot 10^{17}$  1/cm<sup>2</sup> sicher stellen. Dieser Wert stellt einen guten Kompromiss zwischen systematischen Fehlern und Druck in der WGTS dar. Bei steigendem Druck verliert man durch Stöße mit dem Gas mehr und mehr  $\beta$ -Elektronen. Um diese Säulendichte zu erhalten, muss eine Injektionsrate von Tritiumgas von 1,8 mbar-l/s (entspricht 40 g Tritium/Tag) mit einer Genauigkeit <0,1% gewährleistet werden.
- ♦ eine hohe Tritiumreinheit von >95% gewährleisten.
- ♦ Tritiumgas aus den direkt nach der WGTS angebrachten differentiellen Pumpstrecken DPS1-F und DPS1-R wieder in den Tritiumpufferbehälter zurück führen.



**Abbildung 3.1: Vereinfachtes Schema des Tritium Loop mit WGTS/DPS1**

Zu sehen sind neben dem Quellrohr (WGTS) und der sich direkt anschließenden differentiellen Pumpstrecke (DPS1-R und DPS1-F) die wichtigsten Komponenten des Inner Loop wie das Vakuumsystem, den Lager- und Puffer- und Abfallbehälter sowie den Palladiummembranfilter (Permeator). Die beige hinterlegten und mit blauen Linien verbundenen Teile gehören zum, in einer Handschuhbox aufgebauten Teil des Inner Loop. Weiß hinterlegte und mit blauen Linien verbundene Teile gehören zum außerhalb der Handschuhbox aufgebauten Teil des Inner Loop.

Abbildung 3.1 zeigt die Komponenten in einem stark vereinfachten Flussdiagramm. Dargestellt sind sowohl die Teile innerhalb als auch außerhalb der Handschuhbox (innerhalb = gelb unterlegt).

## 3.2 Das Konzept der Tritiumkreisläufe

Die für das KATRIN Experiment installierten Tritiumkreisläufe im Tritiumlabor Karlsruhe können in zwei größere Teilbereiche unterteilt werden. Dies ist zum einen der in Kapitel 3.2.1 beschriebene „Inner Loop“, welcher teilweise in einer Handschuhbox (2. Hülle) aufgebaut ist. Dazu gehört neben dem Box-Teil der Transport zu/von WGTS und DPS1-R/F. Zum anderen ist dies der „Outer Loop“, beschrieben in Kapitel 3.2.2. Dieser ist für den Transfer von DPS2-F und CPS sowie dem Abscheiden von verunreinigtem Gas, dessen Reinigung sowie dem

Bereitstellen von Tritiumgas hoher Reinheit verantwortlich und umfasst nahezu die gesamte Infrastruktur des Tritiumlabors Karlsruhe.

Insgesamt bilden der Inner Loop und der Outer Loop ein in sich geschlossenes Tritiumkreislaufsystem. Dabei zirkuliert der überwiegende Anteil (ca. 99%) im Inner Loop, weniger als 1% wird ständig zur Reinigung an den Outer Loop abgegeben.

### 3.2.1 Der „Inner Loop“

Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Ein ausführliches Fließbild findet sich im Anhang.

Der Inner Loop, genauer gesagt der sich in der Handschuhbox befindliche Teil des Inner Loops, erfüllt zwei Aufgaben.

1. Den kontrollierten Einlass von Tritiumgas mit einer Rate von  $\approx 1,8 \text{ mbar}\cdot\text{l/s}$  bei einer Schwankung  $< 0,1\%$ . Dies entspricht ca. 40g Tritium am Tag.
2. Die Überwachung der Tritiumreinheit mittels Laser-Raman-Spektroskopie [Sch09]. Daneben erfolgt eine Reinigung durch Palladium-Membranfilter.

Um den ersten Punkt zu erfüllen wurde ein druck geregelter Pufferbehälter am Eingang der Tritium Einspeisekapillare montiert. An diesem wird der Druck gemessen und in Abhängigkeit von der Abweichung vom Sollwert ein Regelventil geöffnet bzw. geschlossen (0-100% Öffnung). Um einen konstanten Leitwert zu gewährleisten wird dieser Behälter zusätzlich temperaturstabilisiert auf 320 K mit einer Genauigkeit von mindestens 0,5 K.

Die Überwachung wird im Inner Loop durch ein zwischen den Behältern für reines Tritium und dem WGTS Pufferbehälter sitzendes Laser-Raman-System erfüllt. Zwei Palladium-Membranfilter („Permeator“, siehe Kapitel 3.4.1) gewährleisten dabei das Abscheiden von Verunreinigungen aus dem Tritiumgasstrom. Dieser lässt nur Wasserstoffisotope passieren. Sämtliche Verunreinigungen werden abgeschieden und im Abfallbehälter für verunreinigtes Tritium zwischen gespeichert. Die Infrastruktur des Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) stellt Tritium mit einer Reinheit von  $> 95\%$  zur Verfügung (siehe Kapitel 3.2.2). Dieses wird im Vorratsbehälter für reines Tritium zwischengespeichert und bei Bedarf zum Ausgleich von abgetrenntem Gas in den Inner Loop eingespeist. Die Austauschrate beträgt maximal 1% vom Gasfluss.

Einen detaillierten Blick auf die Funktionsweise des Inner Loop Systems wird in Kapitel 3.3 gegeben.

### 3.2.2 Der „Outer Loop“ und das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK)

Alle tritiumrelevanten Teile des KATRIN Experiments befinden sich im Tritiumlabor Karlsruhe (TLK). Die Infrastruktur zur Tritiumreinigung und -bereitstellung wird von KATRIN genutzt („Outer Loop“). Daher soll an dieser Stelle ein kurzer Überblick über die Möglichkeiten des TLK gegeben werden.

Gegründet wurde das TLK 1991 um den Tritiumkreislauf für einen Fusionsreaktor zu entwickeln. Das TLK besitzt eine Lizenz zum Umgang und Aufbewahrung von bis zu 40 g Tritium. Um ein Austreten von Tritium aus dem Gebäude zu verhindern, wird die Laboratmosphäre in zwei Stufen (Experimentierbereich, Vorräume) leicht unter Außendruck gehalten. Dadurch entsteht stets eine Strömung in den Experimentierbereich. Ein Schaubild über die Systeme zur Tritiumrückhaltung findet sich im Anhang.

Neben den direkten Systemen zur Tritiumprozessierung stellt das TLK auch konventionelle Infrastruktur wie

- ◆ Lüftungsanlage
- ◆ Versorgung mit Druckluft, Kühlwasser
- ◆ Versorgung mit Hilfsgasen
- ◆ Versorgung mit Elektrizität

zur Verfügung. Die Tritium betreffende Infrastruktur setzt sich zusammen aus:

- ◆ Einrichtungen zur Tritiumspeicherung
- ◆ Reinigung von Tritiumgas (z.B. tritiiertes Methan, tritiiertes Wasser, ...)
- ◆ Trennung von Wasserstoffisotopen
- ◆ Bereitstellung von Tritium an den verschiedenen Experimenten
- ◆ Tritiumtransportsystem
- ◆ Tritiummesstechnik (z.B. Gaschromatografie, GC)
- ◆ Zentrales Tritiumrückhaltesystem
- ◆ Raum- und Boxenluftüberwachung
- ◆ Prozessleitsysteme

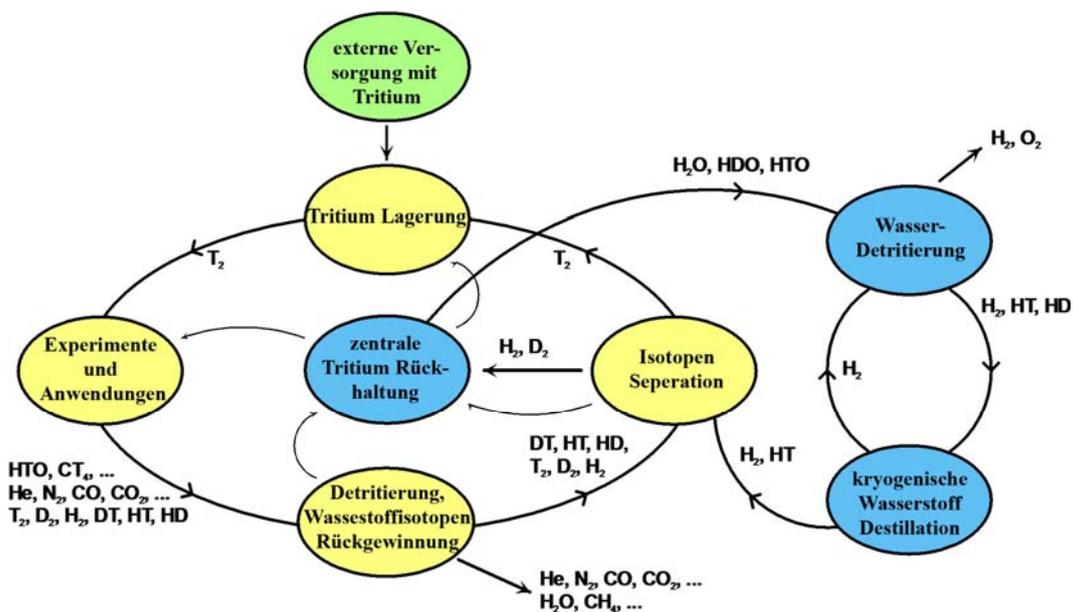
Daher deckt die Infrastruktur praktisch den gesamten Outer Loop von Katrin ab, welcher dazu dient eine geringe Gasmenge (max. 1% des Volumens im Circulation Loop) abzutrennen, zu sammeln und zur Reinigung und Isotopentrennung an die TLK Infrastruktur abzugeben.

Die Sicherheitsphilosophie des TLK besteht aus einem zwei-Hüllen-Prinzip. Die erste Hülle stellt dabei das eigentliche Experiment dar, also sämtliche Rohrleitungen, Pumpen und sonstige Instrumentierung, welche eine Gesamtleckrate von  $<10^{-8}$  mbar·l/s aufweisen müssen. Die zweite Hülle ist in Form von Handschuhboxen realisiert. Diese werden durch eigene Unterdruckhaltungen gegenüber dem Luftdruck im Raum um wenige mbar

niedriger gehalten, wobei die Leckrate dort einen Wert von 0,1 Vol.%/Stunde nicht überschreiten darf. Die Kontamination der Boxenluft wird durch Ionisationskammern überwacht. Jede Box ist mit einem eigenen Tritiumrückhaltesystem (TRS) ausgestattet, um die Boxenluft kontinuierlich zu reinigen.

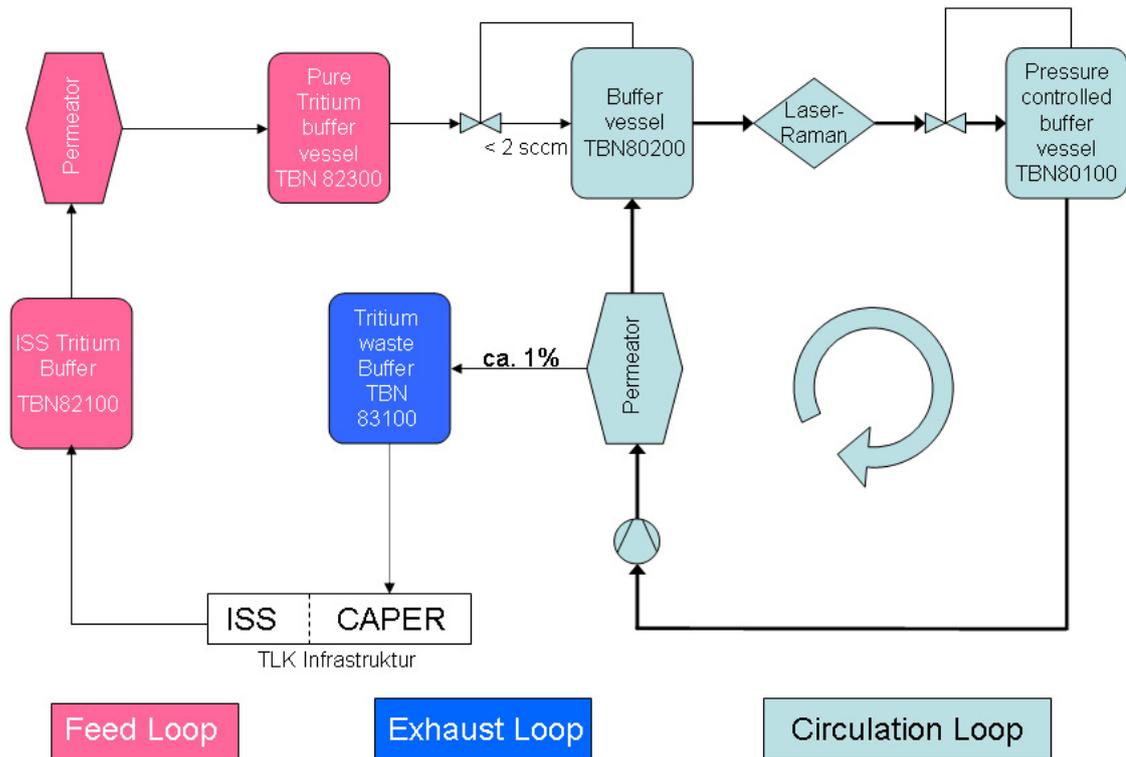
Wie Abbildung 3.3 zeigt, wird kontinuierlich eine kleine Gasmenge an den Tritium Waste Buffer abgegeben. Nachdem eine bestimmte verunreinigte Gasmenge gesammelt wurde, wird diese an die CAPER Einrichtung abgegeben (Abbildung 3.2) [TLK05]. Der CAPER-Prozess wurde entwickelt, um die Plasmaabgase eines Fusionsreaktors von nicht-Wasserstoffisotopen zu reinigen. Die CAPER-Anlage im TLK, mit welcher der Prozess realisiert wurde, dient zum einen als Testeinrichtung für den Prozess selbst. Zum anderen geben sämtliche Experimente im TLK verunreinigtes Tritiumgas an CAPER ab, was CAPER zu einem Teil der TLK Infrastruktur macht.

Nachdem des Gas überwiegend aus Wasserstoffisotopen (DT, HT, HD, H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>, T<sub>2</sub>,...) besteht, erfolgt eine Auftrennung der drei unterschiedlichen Isotope in dem Isotopen Separations System ISS [TLK05]. Die ISS arbeitet nach der Methode der „Displacement gas chromatographie“ und erzeugt die reinen Produkte H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>, T<sub>2</sub>. Es kann mit dieser Anlage eine Tritiumreinheit von >95% erreicht werden.



**Abbildung 3.2: Tritiumkreisläufe im TLK.**

Dargestellt sind die Tritiumkreisläufe angefangen von der externen Versorgung mit Tritium über die Experimente bis hin zur Wiederaufbereitung von Gas.



**Abbildung 3.3: Vereinfachtes Flussdiagramm des Handschuhboxenteils.**

Gezeigt sind Feed Loop, Circulation Loop und Exhaust Loop mit allen Behältern und Permeatoren sowie den wichtigsten Regelventilen.

Gereinigtes und in seine Isotopen aufgetrenntes Gas kann dann entweder direkt an ein Experiment abgegeben werden oder im Tritiumlager in Uran- bzw. ZrCo Speichern (getter bed) gelagert werden ([Bes02], [TLK05]).

Neben den Einrichtungen zur Reinigung und Speicherung stehen noch Systeme zur Überwachung von Gasgemischen wie Gaschromatografie, Massenspektrometer und Szintillationszähler zur Verfügung.

Das Einlagern von neuem Tritiumgas sowie die Versorgung der einzelnen Experimente übernimmt das Tritiumtransferssystem TTS.

### 3.3 Beschreibung des Handschuhboxenteils

Wie in Kapitel 3.2.1 erwähnt, muss eine konstante Einspeisung von Tritium in die WGTS erfolgen. Dies erreicht man durch die im Folgenden beschriebenen Maßnahmen (Abbildung 3.3).

In Analogie zum Ohm'schen Gesetz ( $I = \text{const.}$ ,  $R = \text{const.} \rightarrow U = R \cdot I = \text{const}$ ) berechnet sich die Einspeiserate zu

$$Q = \Delta p \cdot L. \quad (3.1)$$

Dabei bezeichnet in (3.1)  $\Delta p$  den Druckabfall über eine Verbindungsleitung und  $L$  deren Leitwert. Somit ist die Einspeiserate  $Q$  konstant wenn  $\Delta p$  und  $L$  konstant sind. Den konstanten Leitwert erreicht man durch eine Kapillare mit definiertem Durchmesser sowie einer Temperaturstabilisierung. Um ein konstantes  $\Delta p$  zu erhalten muss der Druck in einem Behälter auf einem konstanten Wert gehalten werden, was mittels eines Regelventils geschieht, welches den Gasfluss aus einem zweiten Behälter kontrolliert. Dieser Aufbau findet sich im WGTS Pufferbehälter (Pressure controlled buffer vessel, TBN80100) realisiert, welcher auf 320 K temperaturstabilisiert ist. Außerdem regelt der an diesem Behälter gemessene Druck ein Regelventil zwischen TBN80200 und TBN80100. Da der das Regelventil steuernde Drucksensor ebenfalls temperaturstabilisiert auf 320 K ist, fallen Temperaturschwankungen innerhalb der Handschuhbox hier nicht ins Gewicht und führen nicht zu falschen Regelausschlägen. Dadurch erzielt man eine Druckstabilisierung auf einem Niveau besser als 0,1%. Daneben wird außerdem auch die Verbindungsleitung des Handschuhboxenteils zur WGTS auf konstanter Temperatur gehalten. Die Gewährleistung der Tritiumreinheit wird durch einen Permeator im Zirkulationskreislauf sicher gestellt. Dieser dient zum Abscheiden von sowohl auf dem Transportweg aufgenommenen Verunreinigungen als auch zum Abtrennen von durch Betazerfall entstandenem Helium aus dem Gasfluss. Verunreinigungen und Helium werden über eine Leitung zum Behälter für verunreinigtes Gas (Tritium waste Buffer, TBN 83100) geleitet und dort gesammelt, um später an den Outer Loop (siehe vorheriges Kapitel 3.2.2) abgegeben zu werden. Das Tritium kann den Permeator passieren und wird wieder in TBN 80200 gepumpt, von wo aus der Kreislauf erneut beginnt. Die Tritiumreinheit kontrolliert dabei ein Laser-Raman-System. Dieses sitzt zwischen TBN80200 und TBN80100 und überwacht das sämtliche, zirkulierende Gas. Da durch das Abtrennen von Verunreinigungen dem „Circulation Loop“ immer eine kleine Gasmenge entnommen wird, erfolgt über TBN80200 und TBN82300 (Pure Tritium buffer) ein ständiger Nachschub an reinem Tritiumgas (maximal 2 sccm Gasfluss).

Der Behälter TBN82300 seinerseits wird über einen weiteren Permeator mit Hilfe einer Pumpenkombination (Metal Bellows und Normetex, Kapitel 3.4.3) aus dem Behälter TBN82100 (25 Liter Vorratsbehälter, maximal 900 mbar) mit reinem Tritium befüllt. Dieser Vorgang erfolgt manuell über Schalten entsprechender Ventile und Pumpen. Da es sich bei TBN82300 um einen 3 Liter Behälter handelt, reicht eine Füllung des „ISS Tritium buffers“ (TBN82100) für mehrere Füllungen des „pure Tritium buffer vessels“ (TBN82300) aus.

Um wiederum TBN82100 mit Tritiumgas zu füllen existiert eine direkte Verbindung zur Isotopenseparationsanlage des TLK (ISS, siehe Kapitel 3.2.2). Darüber wird Tritium mit einer Reinheit von >95% zur Verfügung gestellt. Auch dieser Vorgang erfolgt manuell, indem das Tritiumgas aus dem Ausgangsbehälter der ISS in den Inner Loop Pufferbehälter TBN82100 gepumpt wird.

### **3.4 Die Hauptkomponenten im Loop**

Der komplexe Aufbau des Inner Loop setzt sich aus mehreren verschiedenen Komponenten zusammen (komplettes Fließbild im Anhang).

- ◆ 6 Behälter
- ◆ 2 Permeatoren
- ◆ 33 Handventile
- ◆ 33 Automatikventile
- ◆ 4 Flussregler
- ◆ 9 Pumpen
- ◆ 28 Drucksensoren
- ◆ 12 Temperaturmessstellen
- ◆ 4 Heizungen
- ◆ 1 Ionisationskammer
- ◆ 70 Rohrleitungen (daran insgesamt ca. 300 Schweißnähte, 100% Prüfung) plus Adapter sowie T- und Kreuzungsstücke
- ◆ 20 Wellbälge
- ◆ 3 Ventilinseln plus je eine Rückmeldeinsel
- ◆ Prozessleit- und Steuerungssystem

Die wichtigsten Komponenten sollen in den folgenden Kapiteln 3.4.1 bis 3.4.3 kurz beschrieben werden.

Neben dem eigentlichen Rohrleitungssystem existiert noch eine Vielzahl an Elektronik im Rahmen der Prozesssteuerung. Einen knapp gefassten Einblick gibt dazu Kapitel 3.4.4.

#### **3.4.1 Die Permeatoren**

Unter Permeation versteht man den Vorgang, bei dem ein Stoff (in unserem Fall ein Gas) einen Festkörper (eine Palladium-Silber-Membran) atomar durchdringt. Die Triebkraft ist ein Konzentrations- oder Druckgradient.

$$Q = \frac{A}{d} \cdot P \cdot \Delta p \quad (3.2)$$

In Gleichung (3.2) bezeichnet  $Q$  die Flussrate,  $A$  und  $d$  die Membranfläche respektive -dicke,  $\Delta p$  den Druckunterschied und  $P$  die materialabhängige Permeabilitätskonstante [Vac08].

Die Permeatormembran besitzt dabei eine Dicke von  $d \approx 0,1$  mm und eine Fläche  $A = 530 \text{ cm}^2$  (46 Röhren,  $l = 16,2$  cm,  $d = 2,3$  mm (im Circulation Loop)). Hergestellt wurden beide Permeatoren in der Hauptwerkstatt des Forschungszentrums Karlsruhe.

Dabei ist die Membran, also das Filterelement, nur für eine bestimmte Gassorte durchlässig. In unserem Fall ist dies Wasserstoff samt den Isotopen Deuterium und Tritium.

Es findet sich ein Permeator im „Feed-Loop“, also dem Teil der Anlage welche zum Befüllen mit frischem Tritiumgas vorgesehen ist sowie im „Circulation-Loop“. Letzterer reinigt das durch die WGTS zirkulierende Gas bei jedem Umlauf. Verunreinigungen werden vor dem Permeator gesammelt und abgeführt. Zur Vermeidung der Bildung von Metallhydriden (Zerstörung der Membran) wird der Permeator auf  $400^\circ\text{C}$  erhitzt, bevor Wasserstoff die Palladium-Silber-Membran berührt.

### 3.4.2 Die Ventile, Drucksensoren und Flussregler

Insgesamt wurden im Bereich der ISS Box ca. 70 Ventile (Hand und Automatik) sowie knapp 30 Drucksensoren verwendet. An Ventilen kommen zum einen handbetätigte, zum anderen über das Leitsystem (Kapitel 3.4.4) automatisch gesteuerte Pneumatikventile zum Einsatz. Letztere werden aufgrund von Brandschutzvorschriften mit  $\text{N}_2$  Gas betrieben. Die Ventile dienen zum Steuern und Abgrenzen der einzelnen Bereiche (Feedloop, Circulationloop, usw.) voneinander im Betriebsfall und zum Schutz von Komponenten sowie Umgebung im Störfall. Die Ventile müssen ganzmetallisch dichten, da an Gummi- oder Teflondichtungen Reaktionen mit Tritium stattfinden. Dies würde z.B. aggressive Fluorwasserstoffe bilden, welche zu Korrosion in den Leitungen führen.

Drucksensoren überwachen dabei die in den jeweiligen Teilabschnitten herrschenden Drücke und lösen ggf. das Schalten von Ventilen und/oder Pumpen aus bzw. gehen in einen Alarmzustand. Zum Einsatz kommen folgende Drucksensoren des Herstellers MKS:

- ◆ Hochgenaue Sensoren MKS Typ 690A12TRC/A, temperaturstabilisiert
- ◆ 626A01MBE9/ 626AX13MBD
- ◆ 722A12TCE2FA
- ◆ 870B13TCD4GL1
- ◆ Druckschalter 51A 13MCA2BA700

Hochgenaue Sensoren des 690er Typs dienen dabei der Überwachung des Drucks im WGTS-Pufferbehälter, also einer der wichtigsten Größen in Betracht auf einen konstanten Gasstrom in die WGTS. Die technischen Daten aller Sensoren finden sich im Anhang.

Druckschalter dienen nur zur Schadensvermeidung bei Pumpen, falls diese ausgangsseitig gegen einen zu hohen Druck arbeiten sollten. Alle anderen Sensortypen sind auf die jeweiligen Messbereiche zugeschnittene Geräte und dienen zur Anzeige und Regelung.

Des Weiteren befinden sich noch verschiedene Flussregler im Kreislauf, um den Gasstrom z.B. aus oder in Bufferbehälter zu überwachen und ggf. zu regeln. Dies dient der Aufrechterhaltung eines konstanten Druckes und in Verbindung mit einer gleichbleibenden Temperatur eines konstanten Volumenstroms.

### 3.4.3 Die Pumpen

Zum Erzeugen von Vakuum, dem Füllen und Leeren der Tritiumkreisläufe sowie dem Zirkulieren von Tritiumgas während der Messphase finden drei unterschiedliche Pumpentypen Anwendung. Aufgrund der geforderten Tritiumkompatibilität müssen die Medien berührenden Teile ganzmetallisch sein. Außerdem muss die Pumpe einen ölfreien Betrieb gestatten, um die Reinheit des zu fördernden Mediums zu gewährleisten.

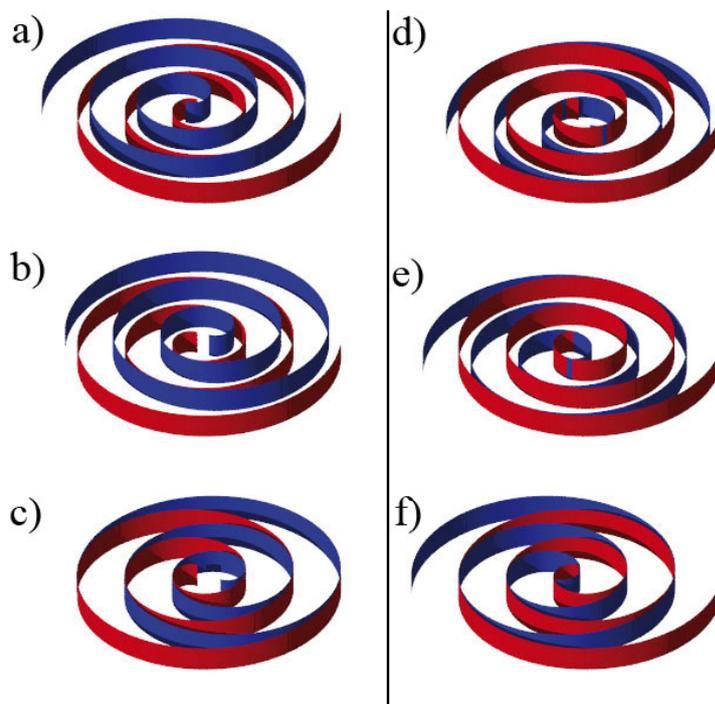
#### 1. *Spiraltaumelpumpe oder Scrollpumpe:*

Dieser Pumpentyp wurde bereits 1905 von Léon Creux erfunden [Cre05]. Dabei war seine Erfindung ursprünglich als Rotationsmotor gedacht. Die Funktion beruht auf zwei ineinander verschachtelten Spiralen. Üblich ist eine Konstruktion mit einer feststehenden und einer beweglichen Spirale. Die innere Spirale bewegt sich dabei mit einer Taumelbewegung gegenüber der äußeren, feststehenden Spirale. Dabei werden Hohlräume kontinuierlich verschlossen und geöffnet. Es erfolgt auf diese Weise ein Transport von Gas oder Flüssigkeit zur Mitte hin. Dort erfolgt dann der Austritt des transportierten Mediums (Abbildung 3.4). Wird die Spiralgeometrie so ausgelegt, dass sich die Spiralen gerade eben nicht berühren, kommt dieser Pumpentyp ohne Ölschmierung aus.

Zur Anwendung kommen vier Spiraltaumelpumpen des Herstellers Normetex Typ 15. Der maximale Ausgangsdruck beträgt ca. 100 mbar, es wird also noch eine Vorpumpe benötigt. Die technischen Daten finden sich im Anhang.

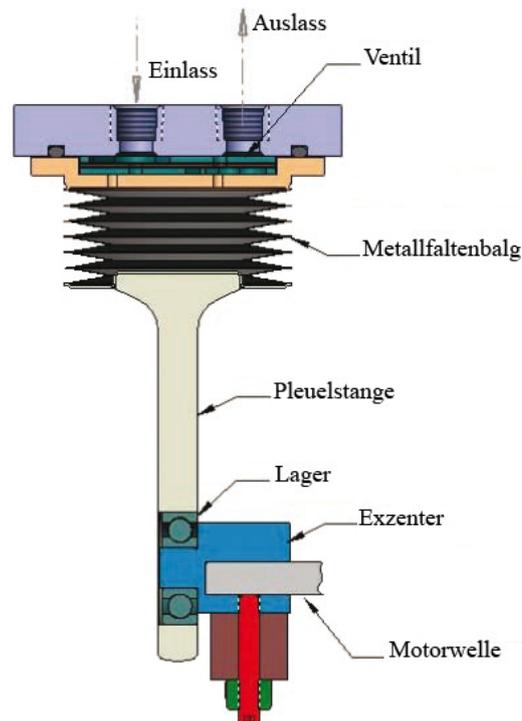
## 2. Metallfaltenbalgpumpe

In Abbildung 3.5 ist der Aufbau einer Metallfaltenbalgpumpe dargestellt. Bei einer solchen Pumpe wird über einen Exzenter sowie ein Pleuel ein Metallbalg gestaucht und gedehnt. Dabei ist das obere Ende des Balgs mit den Ventilen fest mit dem Gehäuse verbunden, der verschlossene Boden wird durch den Pleuel bewegt. Ein- und Auslass können jeweils nur in der entsprechenden Richtung durchströmt werden. Somit besitzt dieser Pumpentyp ein komplett aus Metall bestehendes und versiegeltes Pumpvolumen. Eine Schmierung durch Öl ist nicht notwendig. Zum Einsatz kommen vier Pumpen des Herstellers Metal Bellows Typ MB-601DC (doppelwandig). Der maximale Ausgangsdruck beträgt ca. 1500 mbar, der erreichbare Eingangsdruck ca. 50 mbar. Daher dient dieser Pumpentyp als Vorpumpe zu den Spiraltaumelpumpen.



**Abbildung 3.4: Funktionsprinzip einer Spiraltaumelpumpe (Scroll-pump)**

Beginnend im Pumpzyklus bei a) erfolgt eine Bewegung der inneren Spirale im Uhrzeigersinn a→b→c→d→e→f. Die innere, blaue Spirale rotiert dabei nicht, sondern bewegt sich auf einer exzentrischen Bahn relativ zur äußeren, roten Spirale [WiS09].



**Abbildung 3.5: Schematischer Aufbau einer Metallfaltenbalg Pumpe**

Dargestellt sind die Hauptkomponenten einer Metallfaltenbalgpumpe. Das eigentlich pumpende Element ist der Metallfaltenbalg, welcher über die Pleuelstange gedehnt und gestaucht wird. Ein- und Auslassventile sind nur in einer Richtung vom Medium passierbar [MeB09].

### 3. Turbomolekularpumpe

Eine Turbomolekularpumpe (TMP) besteht aus einem statischen System von Leitblechen sowie einem sehr schnell rotierenden (mehrere  $10^4$  Umdrehungen/Minute) Rotor. Dieser ist ähnlich der Verdichterstufe einer Turbine aufgebaut. Das Funktionsprinzip liegt darin, dass den ankommenden Atomen oder Molekülen ein zusätzlicher Impuls in Richtung Auslass mitgegeben wird. Abhängig von der Masse des zu pumpenden Atoms oder Moleküls reicht dieser Impuls zum Verlassen der Pumpe oder nicht. Daher besitzt eine TMP für unterschiedliche Gassorten auch ein unterschiedliches Pumpvermögen.

Da sich eine TMP beim direkten Betrieb gegen Atmosphärendruck aufgrund der Reibung zu stark erhitzen sowie in die Magnetlagerung gedrückt werden würde, müssen dieser Pumpen zum Erzeugen eines Vorvakuums vorgeschaltet werden. Diese Aufgabe übernehmen im LOOP Aufbau die zuvor beschriebenen Spiraltaumel- sowie Metallfaltenbalgpumpe.

Zum Einsatz kommt eine magnetgelagerte Turbomolekularpumpe vom Hersteller Pfeiffer Typ TMU 200M P.

### 3.4.4 Die Prozessleit- und Sicherheitssysteme

Die Steuerung der einzelnen Geräte, die Messwertaufnahme sowie das Auslösen von Sicheren Zuständen wird von einem lokalen Leitsystem (LLS) übernommen. Es kommt eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) vom Typ Siemens Simatic S7 zum Einsatz. Diese ist hochverfügbar, also redundant, aufgebaut. Das Einlesen der vom Aufbau gelieferten Werte erfolgt über D/A Wandler mit 12 oder 14 bit Auflösung (z.B. 0-10V Signale von Drucksensoren) bzw. digitale I/O Kanäle (z.B. Endlageschalter von Ventilen).

Insgesamt wurden verwendet:

- ◆ 2 CPU's um Ausfallsicherheit zu erhöhen
- ◆ 47 A/D Wandler(kanäle)
  - 17 mal 16 bit Auflösung, jedoch z.T. mit Einschränkung auf 15 oder 14 bit aufgrund nicht angepasstem Spannungsbereich
  - 30 mal 12 bit Auflösung
- ◆ 8 D/A Wandler(kanäle) mit 12 bit Auflösung (0...10 V)
- ◆ 22 digitale I/O Kanäle

Es findet eine Unterscheidung von insgesamt sieben sicheren Zuständen (A1-A7) [Stu10] [STB09] statt, welche je nach Art des Problems von der SPS ausgelöst werden, um einen Austritt von Tritiumgas oder einen Komponentenschaden zu vermeiden.

Die Auslösung hart verdrahteten Sicherheitsschaltung (Zustand B) wird von einem zentralen TLK-System übernommen und muss nach einer Verriegelung zuerst manuell von der TLK Leitwarte aus quittiert werden, bevor das LLS wieder die Kontrolle über den Aufbau übernehmen kann.

## 3.5 Qualitätssicherung und Inbetriebnahme

Da es sich beim Loopaufbau durchgängig um Tritium führende Bereiche handelt, müssen neben den Randbedingungen, welche KATRIN fordert, ebenfalls die Richtlinien des TLK eingehalten werden. Diese beinhalten unter anderem eine strikte Überprüfung der Schweißnähte nach DIN sowie eine Überprüfung des Gesamtaufbaus auf Leckage. Ein Test sämtlicher elektrischer Sicherungseinrichtungen ist obligatorisch. In diesem Abschnitt wird dieser Prozess beschrieben.

- ◆ Fabrikation und Prüfung zertifizierter Rohrleitungen und Komponenten
- ◆ Reinigung und Lecktest einzelner Rohrleitungen
- ◆ Einzellecktests

- ◆ Dokumentation
- ◆ Montage in der Handschuhbox
- ◆ Elektrische Inbetriebnahme

- ◆ *Fabrikation und Prüfung zertifizierter Rohrleitungen und Komponenten*

Nachdem die Hauptkomponenten innerhalb der Rahmenstruktur in der Handschuhbox montiert waren, konnten die benötigten Verbindungsleitungen aus zertifizierten Edelstahlrohren und Anschlussstutzen gebogen und gegebenenfalls mit Adaptern, Kreuzungen, usw. versehen werden. Es kamen Rohrleitungen mit 6 mm sowie 12 mm Außendurchmesser zum Einsatz. Sämtliche Anschlüsse der Rohrleitungen wurden mit hochvakuumfähigen VCR Verbindungen ausgestattet. Diese dichten ganzmetallisch durch eine Edelstahldichtscheibe, welche zwischen zwei VCR Anschlussstutzen gelegt wird (Anhang E).

Nach dem Zuschneiden und Biegen vor Ort wurde die Leitung mittels Orbitalschweißen gefügt. Bei diesem Schweißverfahren fährt der Schweißkopf um die Naht herum und schmilzt den Werkstoff dabei auf. Damit der schmelzflüssige Werkstoff bis zum Erstarren in der richtigen Position bleibt, wird dieser durch einen Gasfluss im Innern des zu schweißenden Rohres unterstützt. Dieser Gasfluss muss für jede Schweißung in Abhängigkeit der Rohrlänge sowie des Rohrdurchmessers neu justiert werden.

Darin besteht auch die Schwierigkeit dieser Art der Fügetechnik, was zu etwa 30% fehlerhaft geschweißten Rohrleitungen geführt hat. Die Fehler wurden mittels Röntgengendurchstrahlprüfung erkannt. Es wurde jede einzelne Schweißnaht unter drei Richtungen geröntgt (je 120°) und ausgewertet. Einige Beispiele für fehlerhafte Verbindungen sind in Abbildung 3.6 dargestellt.

- ◆ *Reinigung und Lecktest einzelner Rohrleitungen*

Nach bestandener Durchstrahlungsprüfung mussten die Leitungen gereinigt werden, um sicher zu stellen, dass sich keine größeren Fremdkörper (z.B. Sandkörner oder Metallspäne von der Herstellung) im Inneren einer Leitung befinden. Diese würden im schlimmsten Fall im Betrieb gelöst und könnten in einer Pumpe einen beträchtlichen Schaden während des Betriebs verursachen.

Die Reinigung wurde mit einer auf 60 °C erhitzten Seifenlauge durchgeführt. Diese wurde an einem Ende der Rohrleitung eingeleitet, wobei die restlichen Anschlüsse der Leitung offen waren. Der ursprüngliche Spülaufbau sah vor, nur einen Anschluss offen zu lassen. Bei mehr als zwei Stutzen pro Leitung sollten alle weiteren blind geflanscht werden. Die Prozedur wäre dann für jeden Anschluss zu wiederholen. Da dies aber potentiell die Gefahr birgt, dass sich Fremdkörper an einer Abzweigung sammeln könnten ohne aus einem Anschluss gespült zu werden, wurde entschieden, alle Anschlüsse gleichzeitig

offen zu lassen und die Förderleistung der Pumpe etwas zu erhöhen. Somit wurde ein ausreichender Fluss an Lauge gewährleistet und potentielle Fremdkörper sicher entfernt.

Damit keine Korrosion entstehen kann, wurden alle Leitung direkt nach dem Spülen mit Lauge auch noch mit vollständig entsalztem Wasser (VE-Wasser) gereinigt und anschließend mit heißem Stickstoff (ca. 150...180 °C) getrocknet und danach verschlossen. Abbildung 3.7 zeigt den verwendeten Aufbau schematisch. Ein Protokoll über die verwendeten Parameter wurde für jede Leitung erstellt.

◆ *Einzellecktests*

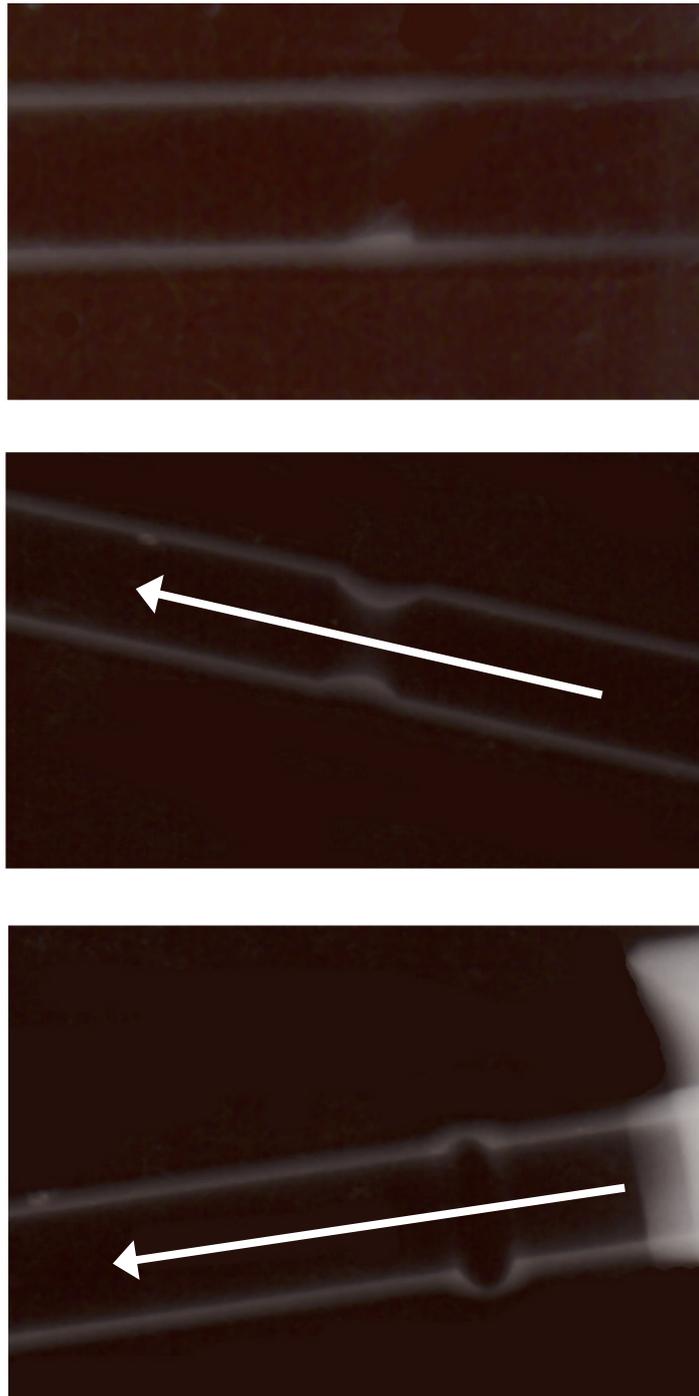
Nach Reinigung aller Leitungen wurden diese einzeln auf die geforderte Einzel-leckrate von  $<10^{-9}$  mbar·l/s geprüft. Dies geschah mit Hilfe eines Heliumlecktesters. Die Summe der ermittelten Leckraten beträgt  $2,3 \cdot 10^{-9}$  mbar·l/s und liegt somit deutlich innerhalb der geforderten Grenzen von  $10^{-8}$  mbar·l/s. Hinzu addieren sich noch die Leckraten durch Komponenten wie T-Stücke, Kreuzungen, Pumpen, usw., welche in der integralen Leckrate enthalten sind.

◆ *Dokumentation*

Als letzter Schritt zur Qualitätssicherung wurden alle Rohrleitungen einzeln fotografiert (bei komplizierten Leitungen mehrere Bilder aus unterschiedlichen Richtungen), vermessen, die bei der Herstellung per Hand gezeichneten Isometrien geprüft und gegebenenfalls korrigiert sowie ein 3D CAD Modell aller Leitungen erstellt.

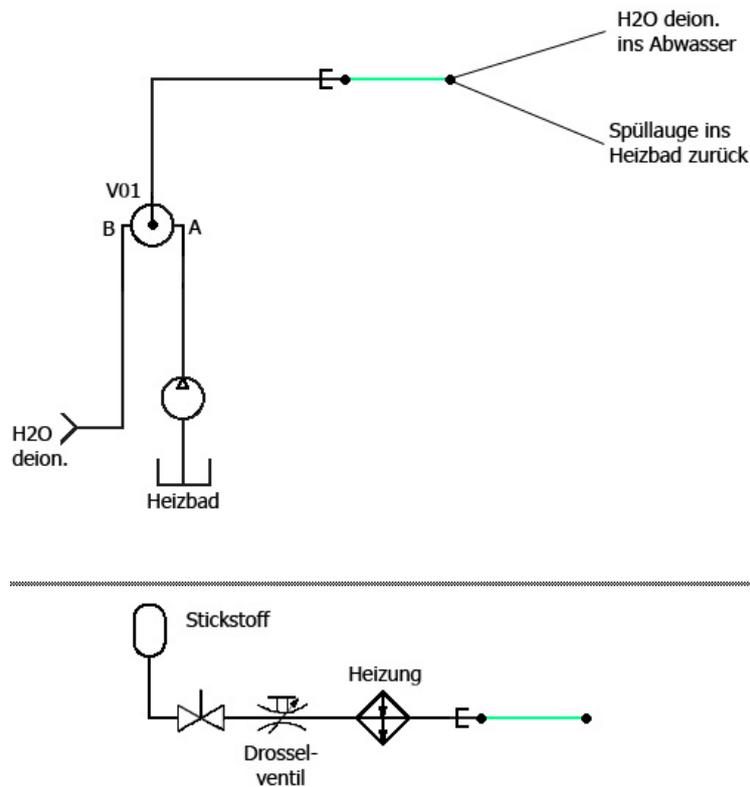
Abbildung 3.8 zeigt exemplarisch zwei Leitungen. Parallel dazu wurden Stücklisten mit allen in einer Leitung verbauten Komponenten inklusive Verweis auf Lieferant und Zertifikatnummer erstellt.

Außerdem werden sämtliche Materialzeugnisse (Zertifikat der Schmelze, Materialzeugnis, Schweißerzeugnis, ...) aller Teile, welche innerhalb der Handschuhbox verbaut und mit Tritium in Berührung kommen, archiviert.



**Abbildung 3.6: Beispiele für fehlerhafte Schweißungen.**

Die untere Abbildung zeigt das Resultat eines zu hohen Gasflusses innerhalb der Leitung. Die Schmelzflüssige Naht wurde nach außen gewölbt und erkaltete dort. Die Abbildung in der Mitte zeigt das gegenteilige Verhalten. Hier war der Gasdruck offensichtlich zu gering, es bildete sich eine Taille auf der Außenseite was zu einer Querschnittsverengung führte. Das obere Bild zeigt das Resultat einer unzureichenden Ausrichtung von zwei Rohrenden zueinander. Das Resultat ist eine scharfe Kante auf der Innenseite der Rohrwand. Der Gasdruck war in diesem Beispiel in Ordnung. Die eingezeichneten Pfeile geben exemplarisch die Gasflussrichtung an. Es handelt sich bei allen Leitungen um Rohre mit 6 mm Außen und 4 mm Innendurchmesser.



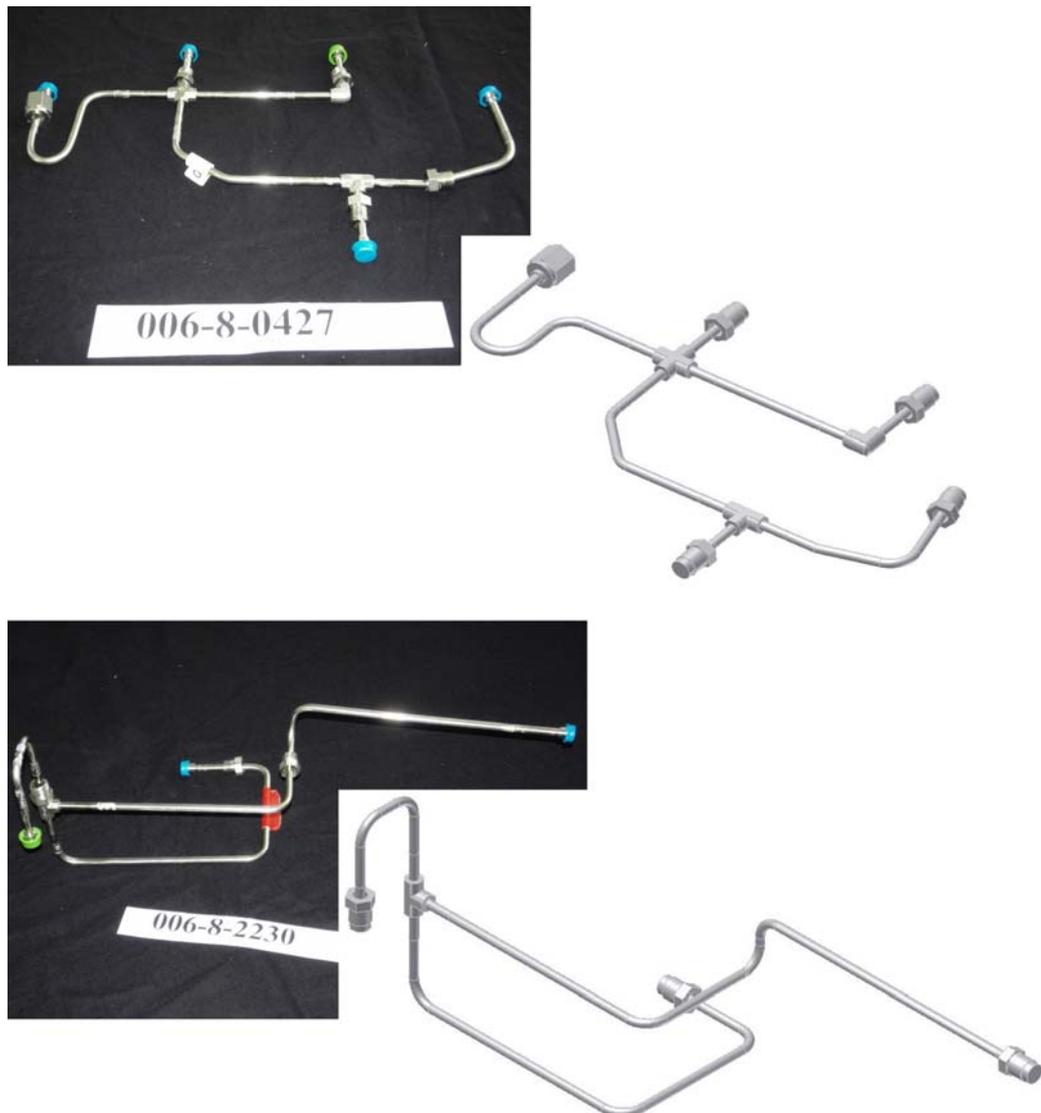
**Abbildung 3.7: Schematische Darstellung des Spül- und Trocknungsaufbaus**

Dargestellt ist oben der Spülaufbau mit den beiden Optionen „Lauge“ und „VE-Wasser“ (deion. Wasser) sowie unten der Aufbau zur Trocknung einer Rohrleitung. Exemplarisch in grün dargestellt ist die zu spülende Leitung.

♦ *Montage in der Handschuhbox*

Nachdem alle Maßnahmen zur Qualitätssicherung erfüllt wurden, erfolgte der Einbau der Rohrleitungen in die bereits mit den größeren Komponenten bestückte Handschuhbox. Dabei musste besondere Sorgfalt darauf gelegt werden, dass die VCR Verbindungsflansche sauber sind und während der Montage nicht verkratzt werden. Sämtliche Flansche wurden daher mit einem fusselfreien und Aceton getränkten Tuch manuell gereinigt. Als Dichtung wurden durchgängig Edelstahldichtscheiben verwendet.

Einige wenige Flansche, z.B. an Pumpen oder vereinzelt Kreuzungen, wurden wegen eines zu großen Leitungsdurchmessers nicht in VCR Technik sondern in CF Technik montiert. Dabei wird eine Kupferdichtscheibe mit mehreren Schrauben zwischen zwei Edelstahlflanschen geschnitten und die Verbindung somit den Erfordernissen der Hochvakuumtechnik nach gedichtet (siehe Anhang für Details).



**Abbildung 3.8: Fotografien und CAD Zeichnungen zweier Leitungen**

Zum Zwecke der Dokumentation erstellte Fotografien und 3D CAD Zeichnungen von Leitungen des Inner Loop.

Abschließend wurden alle Druckluftversorgungsleitungen von den drei Ventilinseln zu den einzelnen Automatikventilen gelegt. Zum Schalten der Ventile kommt aus Gründen des Brandschutzes Stickstoff zum Einsatz und keine Druckluft (die Handschuhboxenatmosphäre ist mit Stickstoff inertisiert und besitzt einen maximalen Anteil von 1 % Sauerstoff).



**Abbildung 3.9: Der Aufbau vor und nach der Montage aller Leitungen**

Im linken Bild zu sehen sind die bereits in die Handschuhbox montierten Hauptkomponenten des Inner Loops. Im rechten Bild wurde die Montage aller Rohrleitungen sowie sämtlicher Druckluftleitungen und Kabel beendet.

◆ *Elektrische Inbetriebnahme*

Es wurden durch Einspeisen von definierten Spannungs- bzw. Stromsignalen die Signalwege aller Sensoren und elektrischen Geräte geprüft. Die Anzeige der Prozesssteuerung wurde gleichzeitig auf ihre Richtigkeit bezüglich des eingespeisten Signals hin verifiziert.

Nach bestandener Prüfung der Signalwege erfolgte eine Überprüfung der Warn- und Abschaltgrenzen der einzelnen sicheren Zustände und der Verriegelung.

Sichere Zustände sind Betriebsmodi, in welche das System „Inner Loop“ automatisch überführt wird, wenn eine technische Störung oder eine Fehlbedienung vorliegt. Es werden insgesamt sieben Sichere Zustände

unterschieden. Eine Verriegelung ist eine Schaltung, in welcher das komplette System in einen sicheren Zustand überführt und komplett verriegelt wird. Ein Benutzer ist nach Auslösen vom lokalen Leitsystem aus nicht mehr in der Lage eine Bedienung durchzuführen, bevor nicht die Ursache behoben und der Zustand in der zentralen Leitwarte des Tritiumlabors quittiert wurde.

♦ *Integraler Lecktest*

Nachdem die elektrische Inbetriebnahme erfolgreich beendet wurde, erfolgte eine erneute Überprüfung aller Verbindungsstellen.

- VCR Verbindungen (Rohrleitungen, T-Stück, Adapter, ...)
- CF Verbindungen (Pumpenflansche, Kreuzungen, ...)

Dazu wurden einzelne Teile des Loop-Aufbaus mit einem Heliumlecktester evakuiert und durch Einsprühen mit Helium auf Leckagen untersucht. Die erforderliche Einzelleckrate betrug hier ebenfalls  $<10^{-9}$  mbar·l/s. Überschritt eine Verbindung diesen Wert, so wurden Dichtungen und/oder Adapter, Kreuzungen, T-Stücke ausgetauscht.

Nachdem diese Prozedur erfolgreich für sämtliche Verbindungen durchgeführt war, erfolgte der sogenannte integrale Lecktest. Dazu wird die Handschuhbox komplett verschlossen und der Heliumlecktester an eine nach außen geführte Leitung zum Evakuieren des Systems angeschlossen. Anschließend wird die komplette Handschuhbox von unten her mit Helium geflutet. Nach einer gewissen Wartezeit wird jeweils Helium nachgefüllt, um etwaige Verluste aufgrund von Undichtigkeiten der Box auszugleichen.

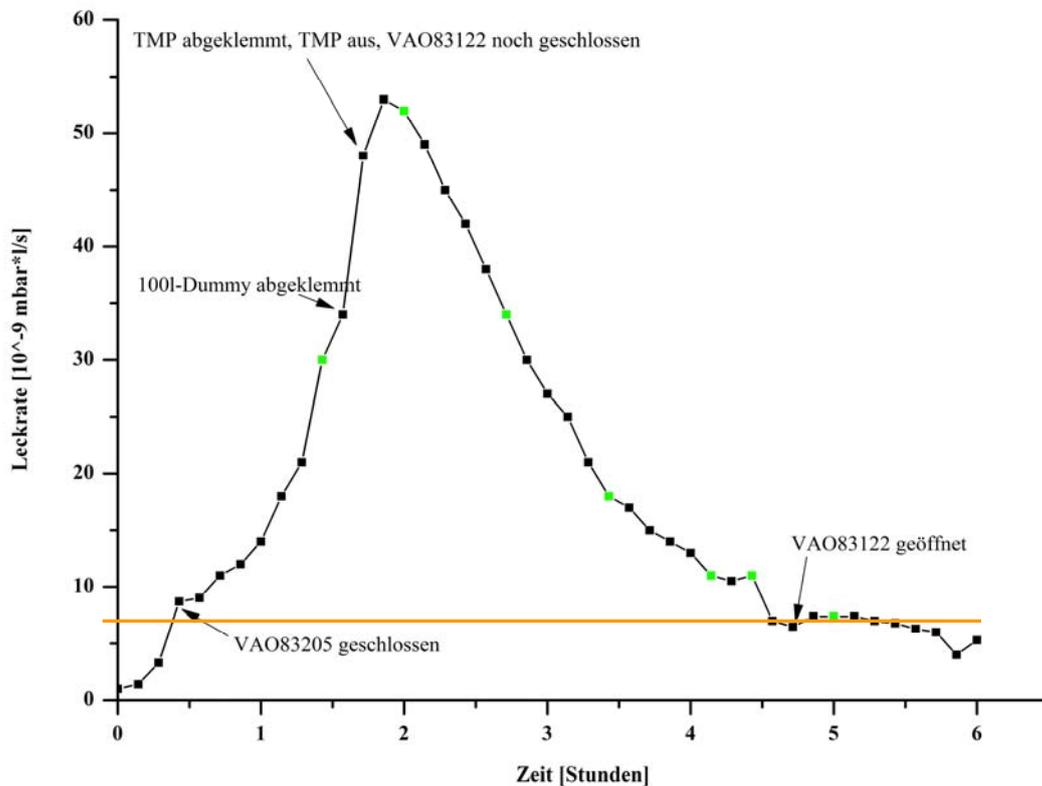
Abbildung 3.10 zeigt das Resultat des integralen Heliumlecktests. Ermittelt wurde eine integrale (also die über den gesamten Aufbau summierte Leckrate aller Einzelleckagen) Leckrate von

$$< 7 \cdot 10^{-9} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}}. \quad (3.3)$$

Dies erfüllt die Bestimmungen des Tritiumlabors Karlsruhe nach welcher Primärsysteme eine integrale Leckrate von

$$< 1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}} \quad (3.4)$$

aufweisen müssen.



**Abbildung 3.10: Resultat des integralen Heliumleckttests.**

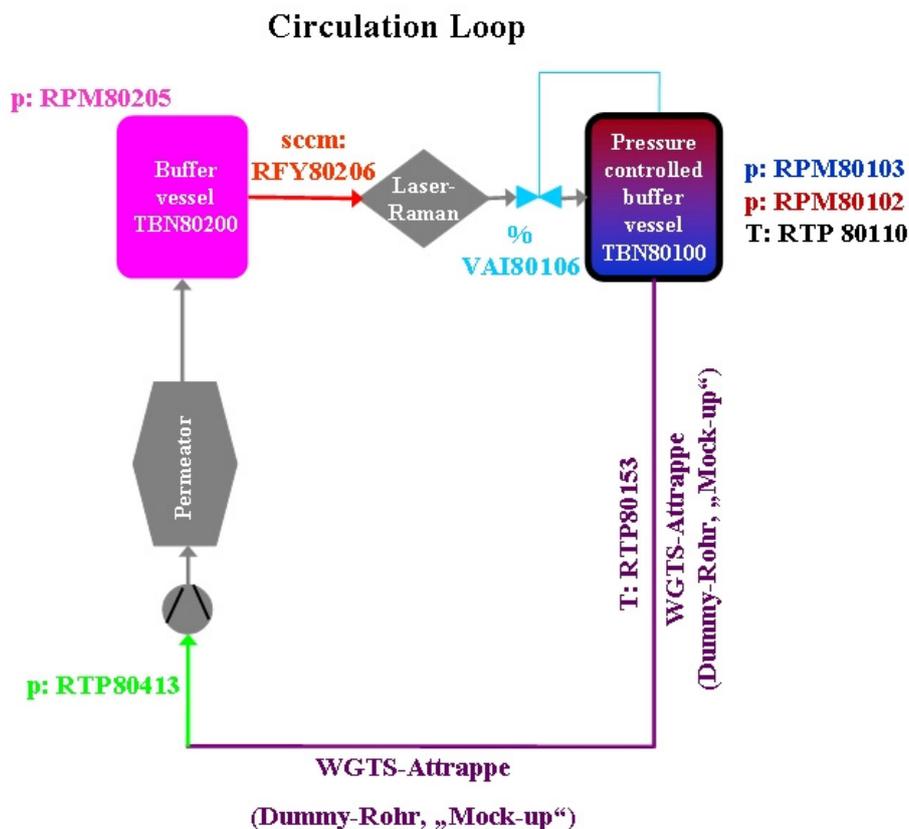
Gezeigt ist die integrale Leckrate über der Zeit seit dem Fluten der Handschuhbox mit Helium. An grün markierten Messpunkten wurde Helium in die Handschuhbox nachgefüllt. Die orange Markierungslinie gibt die (konservative) Leckrate von ca.  $7 \cdot 10^{-9}$  mbar·l/s an.

Der Anstieg auf ca.  $55 \cdot 10^{-9}$  mbar·l/s ist damit zu erklären, dass sich die ersten ca. zwei Stunden auch die zum Vakuumsystem gehörende Turbomolekularpumpe mit im zu prüfenden Kreis befand. Da diese jedoch eine interne O-Ringdichtung besitzt, spezifiziert der Hersteller diese mit einer Leckrate  $< 10^{-7}$  mbar·l/s. Dies ist eine bauartbedingte Besonderheit aller Turbomolekularpumpen. Da diese aber im Vakuumsystem betrieben wird und damit weit weniger Tritiumgas sieht als z.B. eine Pumpe im Circulation Loop, ist die absolute, durch Permeation verursachte Leckage so gering, dass die Boxenluftreinigung dies bewältigen kann. Durch einen extra zu stellenden Tolerierungsantrag (notwendig für alle TMP's im TLK) ist ein Betrieb trotzdem gestattet. Dies ermöglichte das Bestehen des integralen Leckttests mit der Leckrate aus (3.1) inklusive der verbauten TMP.

## 4. Verfahrenstechnische Inbetriebnahme des Inner Loop und Messungen

In den folgenden Unterkapiteln soll eine Darstellung der während der Messphase gewonnenen Daten erfolgen. Daran anschließend präsentiert wird in Kapitel 4.5 die Reaktion des Systems durch Aufbringen von äußeren Störungen. Im letzten Abschnitt soll die Auswirkung der in den voran gegangenen Kapiteln gefunden Druckstabilität auf das Gesamtexperiment, vornehmlich auf die Säulendichte  $p_d$  in der WGTS, diskutiert werden.

Um eine bessere Übersicht zu erhalten, wurde den einzelnen Messstellen eine spezifische Farbe zugeordnet. Dieser Farbcode findet sich im gesamten Kapitel in sämtlichen Diagrammen wieder. Zur Veranschaulichung, welcher Sensor an welcher Stelle sitzt, dient das (ebenfalls in den gleichen Farben codierte) vereinfachte Flussdiagramm des Circulation Loop, zu finden in Abbildung 1.



**Abbildung 4.1: Farbschema der Diagramme und Verteilung der Messstellen.**

Dargestellt ist die Position der einzelnen Sensoren. Farben korrelieren mit denen in den Diagrammen. Graue Komponenten besitzen keine Entsprechungen in Diagrammen.

## 4.1 Einstellung der optimalen Regelparameter

Um einen ersten Betrieb zu gestatten wurden alle Regler mit Standardwerten initialisiert. Während der Verfahrenstechnischen Inbetriebnahme (Kapitel 4.2) wurden optimierte Regelparameter für Heizungen und Druckregelung gefunden. Die Parametersuche war mit Abschluss von Run 1 noch nicht beendet, verschiedene Regelungen konnten erst in späteren Runs auf ihre Funktion und Regelgenauigkeit hin untersucht werden (z.B. RTP80153).

Trotz dieses eher zeitlich ausgedehnten Prozesses der Regelparameterfindung soll an dieser Stelle ein zusammenfassender Überblick über den letzten Stand der Einstellungen gegeben werden.

Die erzielten Verbesserungen sind besonders an der Temperaturstabilisierung des WGTS Einlassbehälters gut sichtbar und in Abbildung 4.2 dargestellt. In Tabelle 4.2 werden die Fitparameter des Sinusfits der Temperaturschwankungen vor sowie nach der Regleroptimierung präsentiert.

Das Finden der optimierten Regelparameter dient zur optimalen Ausnutzung der Fähigkeiten der vorhandenen Hardware. Ist z.B. die Regelcharakteristik des Regelventils, welches den Gasfluss in den WGTS Pufferbehälter kontrolliert, nicht optimal, so erhält man unter Umständen auch nicht die gewünschte Druckstabilisierung.

Die Temperaturschwankungen im linken Bereich (bis ca. 146 Stunden) von Abbildung 4.2 weist einen Spitze-Spitze-Wert der Temperatur auf von:

$$\begin{aligned}T_{\min} &= 312,80 \text{ K} \\T_{\max} &= 313,54 \text{ K} \\ \Delta T_{SS} &= 0,74 \text{ K}\end{aligned}\tag{4.1}$$

Diese Schwankungen konnten reduziert werden auf:

$$\begin{aligned}T_{\min} &= 312,05 \text{ K} \\T_{\max} &= 313,22 \text{ K} \\ \Delta T_{SS} &= 0,17 \text{ K}\end{aligned}\tag{4.2}$$

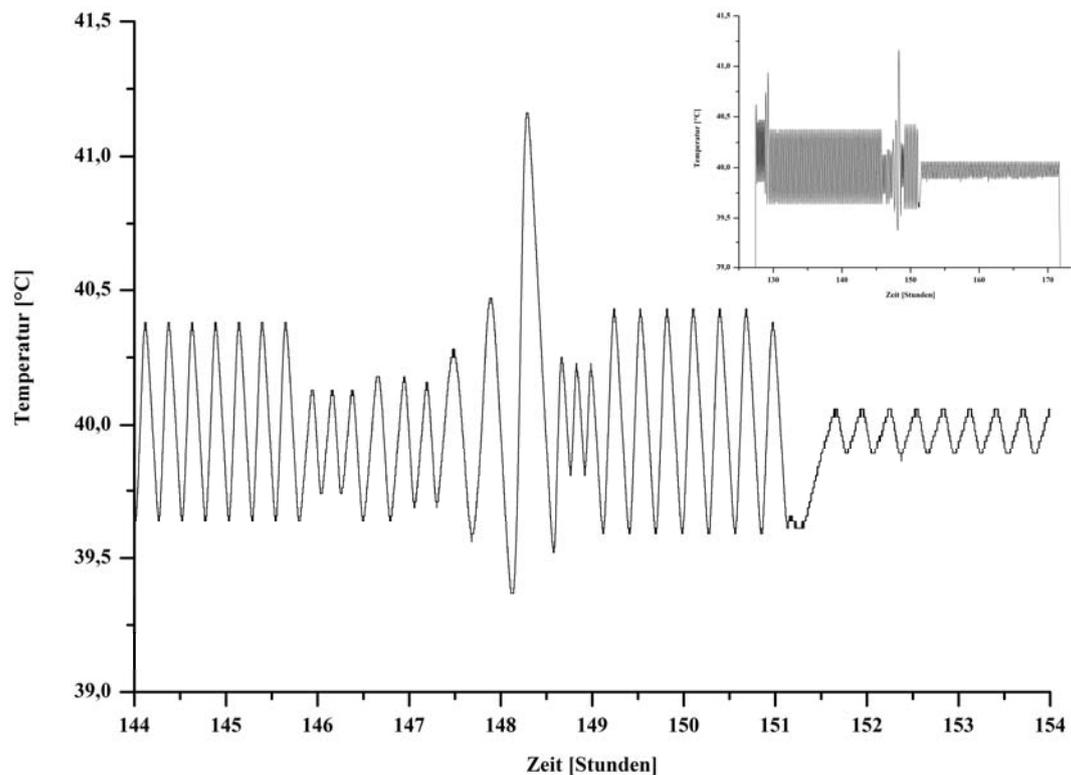
Dies bedeutet eine Verbesserung um einen Faktor 4,3 im Spitze-Spitze-Wert.

Die Parameteroptimierung erfolgte bei 313 K, der spätere Betrieb bei 318 K. Es zeigte sich jedoch, dass die gefundenen Parameter auch bei 318 K zu demselben zufriedenstellenden Ergebnis bezüglich der Temperaturstabilisierung führen.

**Tabelle 4.1: Übersicht der optimierten Regelparameter**

Gain= Integralanteil, T(N)= Proportionalanteil, T(V)=Differentialanteil. Der Wert der Stellgröße gibt die Beschränkung der ausgegebenen Größe (Spannung, maximal 10V am DAC der S7)

Regler	Gain	T(N) [s]	T(V) [s]	Stellgröße [%]	Verzögerung [s]
RTP80110	3	15	0	10	2
RTP80153	3	1	10	22	2
RPM80103	4	10	20	20	2
RPM80205	2	20	10	10	2
RPM83401	1	15	20	100	2
RTC80302	6	1	10	35	2
RTC82202	3	10	0	50	2

**Abbildung 4.2: Parameteroptimierung am Beispiel der Heizung von TBN80100.**

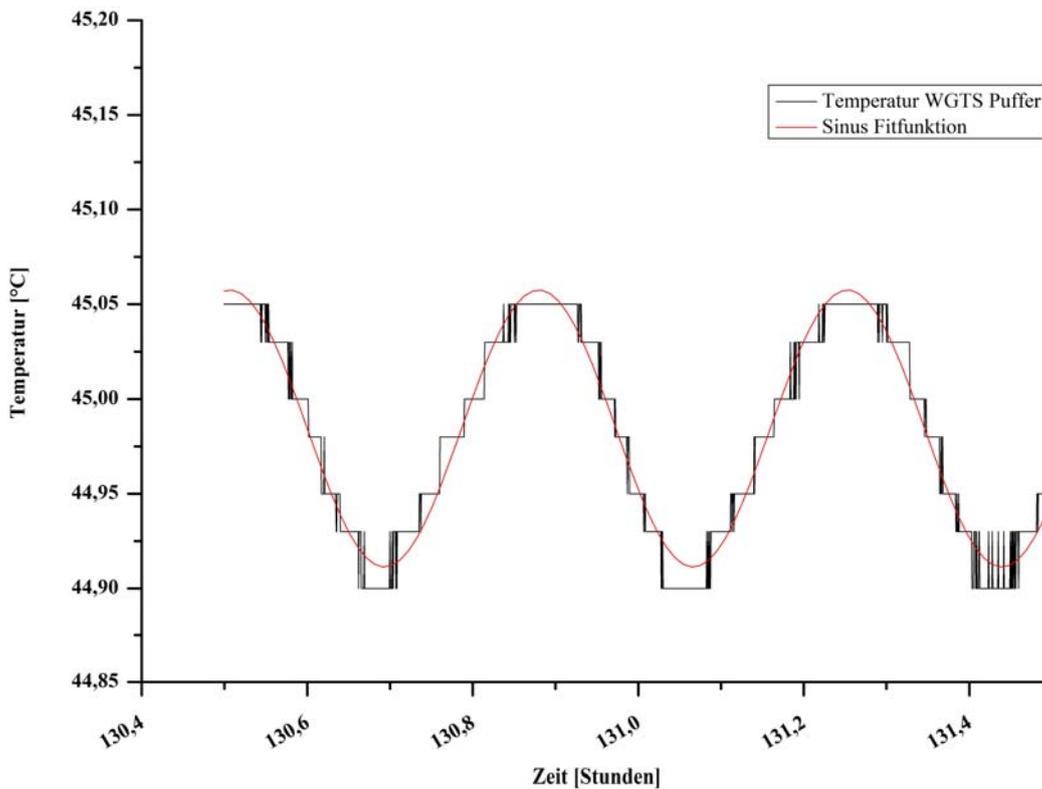
Das Diagramm rechts oben zeigt den ca. 2 Tage dauernden Prozess, im großen Diagramm findet sich die gesamte Region, in welcher verschiedene Parameter getestet wurden.

Dargestellt ist die Temperaturschwankung des WGTS Pufferbehälters TBN80100. Bis  $t=146$  Stunden fanden die anfänglichen Regelparameter Anwendung, ab  $t=146$  bis ca. 151 Stunden wurden verschiedene Werte für P-, I-, und D-Anteil getestet. Die verbesserten Werte aus Tabelle 4.1 finden ab ca. 151 Stunden Anwendung. Zu erkennen sind bereits die diskreten Stufen des AD-Konverters. Die Werte stammen aus Run 2.

Aufgrund der hohen Stabilität der Temperaturregelung war es möglich eine Fitfunktion anzubringen, um die Kenngrößen der Schwankung zu bestimmen:

$$T = T_0 + A \cdot \sin\left(\pi\left(\frac{t-t_0}{w}\right)\right) \quad (4.3)$$

Es ergibt sich damit eine Periodendauer von ca. 0,5 Stunden bei einem Spitze-Spitze-Wert der Temperatur von  $\Delta T_{SS} \approx 0,145$  K nach Optimierung.



**Abbildung 4.3: Fitfunktion an die Temperaturschwankung von TBN80100.**

Dargestellt ist die Temperaturschwankung des WGTS Pufferbehälters TBN80100 (Sensor RTP80110) über einen Zeitraum von ca. einer Stunde sowie die daran angebrachte Sinus-Fitfunktion. Die Werte stammen aus Run 2.

**Tabelle 4.2: Übersicht der Fitgrößen der Sinusfunktion.**

	vor Parameteroptimierung (Sollwert: 40°C)	nach Parameteroptimierung (Sollwert: 45°C)
$T_0$ [°C]	40,017	44,984
$t_0$ [h]	-2,881	-15,431
$w$ [h]	0,128	0,187
$A$ [°C]	0,339	0,073
Korr R-Quadrat	0,98	0,96

## 4.2 Übersicht der Messphasen

Bevor in den sich anschließenden Kapiteln 4.3 bis 4.6 eine ausführliche Diskussion der gewonnenen Daten statt finden wird, soll an dieser Stelle eine Übersicht über die einzelnen Messungen gegeben werden.

Tabelle 4.3 gibt Aufschluss über die Art des bei einem Run verwendeten Gases und über die Dauer des Runs. Daneben findet sich in der letzten Spalte „Ziel des Runs“ der Hauptgrund für einen Run. Natürlich war es bei jedem Run das Ziel, die Druckstabilisierung so gut wie möglich zu realisieren. Trotzdem fanden während verschiedenen Runs noch zusätzliche Aktionen, wie z.B. das Auffinden optimierter Regelparameter statt.

## 4.3 Die Verfahrenstechnische Inbetriebnahme – Run 1

Nachdem sämtliche Dichtheitsprüfungen sowie die elektrische Inbetriebnahme erfolgreich bestanden waren, folgte der erste Versuch des druckstabilisierten Zirkulierens im Circulation Loop, welcher gleichzeitig die verfahrenstechnische Inbetriebnahme darstellt.

Der erste Lauf erfolgte anstelle von  $D_2$  mit  $N_2$ . Dies hatte mehrere Gründe:

- ◆ Es besteht keinerlei Explosionsgefahr.
- ◆ Falls ein Leck entstehen sollte gestaltet sich die anschließende Lecksuche bedeutend einfacher (der Lecksucher arbeitet mit  $^4He$  als „Detektionsgas“;  $D_2$  produziert daher einen nur langsam abzubauenden Untergrund).
- ◆ Da die Permeatorheizung zu diesem Zeitpunkt noch nicht betriebsbereit war, konnte nur im Bypassbetrieb gearbeitet werden (auch bei Verwendung von  $D_2$ ).

**Tabelle 4.3: Übersicht der Messphasen.**

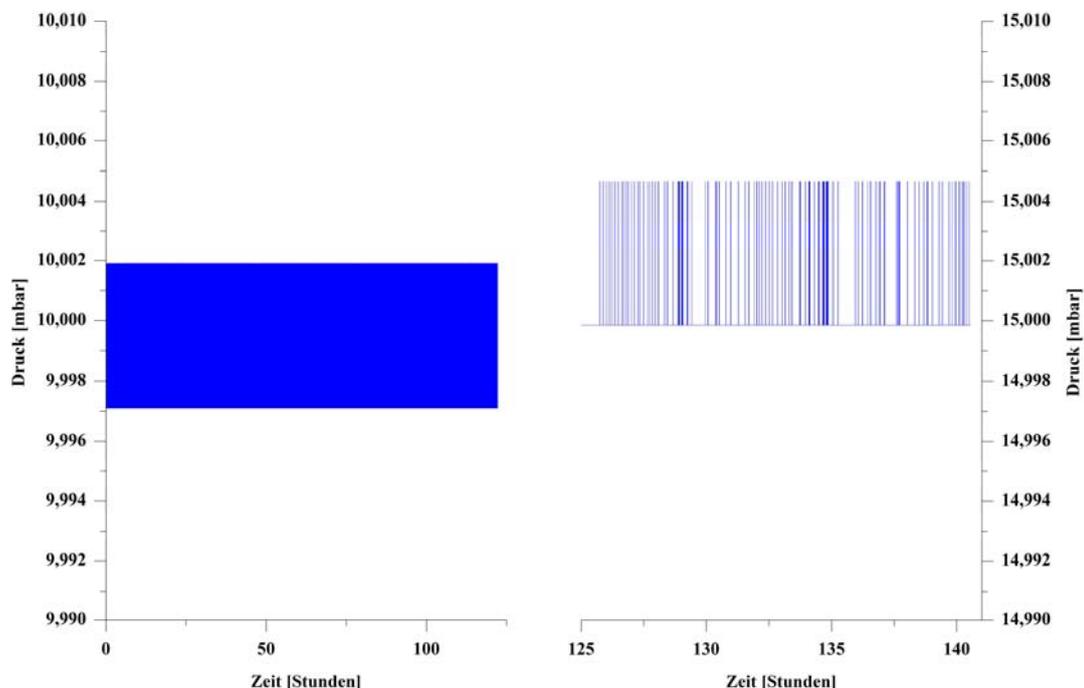
Run #	zirkulierendes Gas	Dauer des Runs ca. [h]	Ziel des Runs
1	Stickstoff	140	Verfahrenstechnische Inbetriebnahme, Auffinden von Regelparametern
2	Stickstoff	320	Auffinden optimierter Regelparameter für Druckregelung und Temperaturstabilisierung
3	Deuterium	1	erster Test mit Deuterium, abgebrochen wegen Pumpenschaden
4	Deuterium	220	Langzeitstabilitätstest, abgebrochen durch sicheren Zustand A5 (ausgelöst durch Loopino S.69)
5	Deuterium	450	Wiederaufnahme des Langzeitstabilitätstests, Temperaturvariation der WGTS-Attrappe

Die Datennahme des Drucks am WGTS Pufferbehälter erfolgte in diesem Run aufgrund technischer Schwierigkeiten nur mit dem Drucksensor RPM80103 (regelnder Sensor) und nicht zusätzlich noch mit dem Kontrollsensor RPM80102.

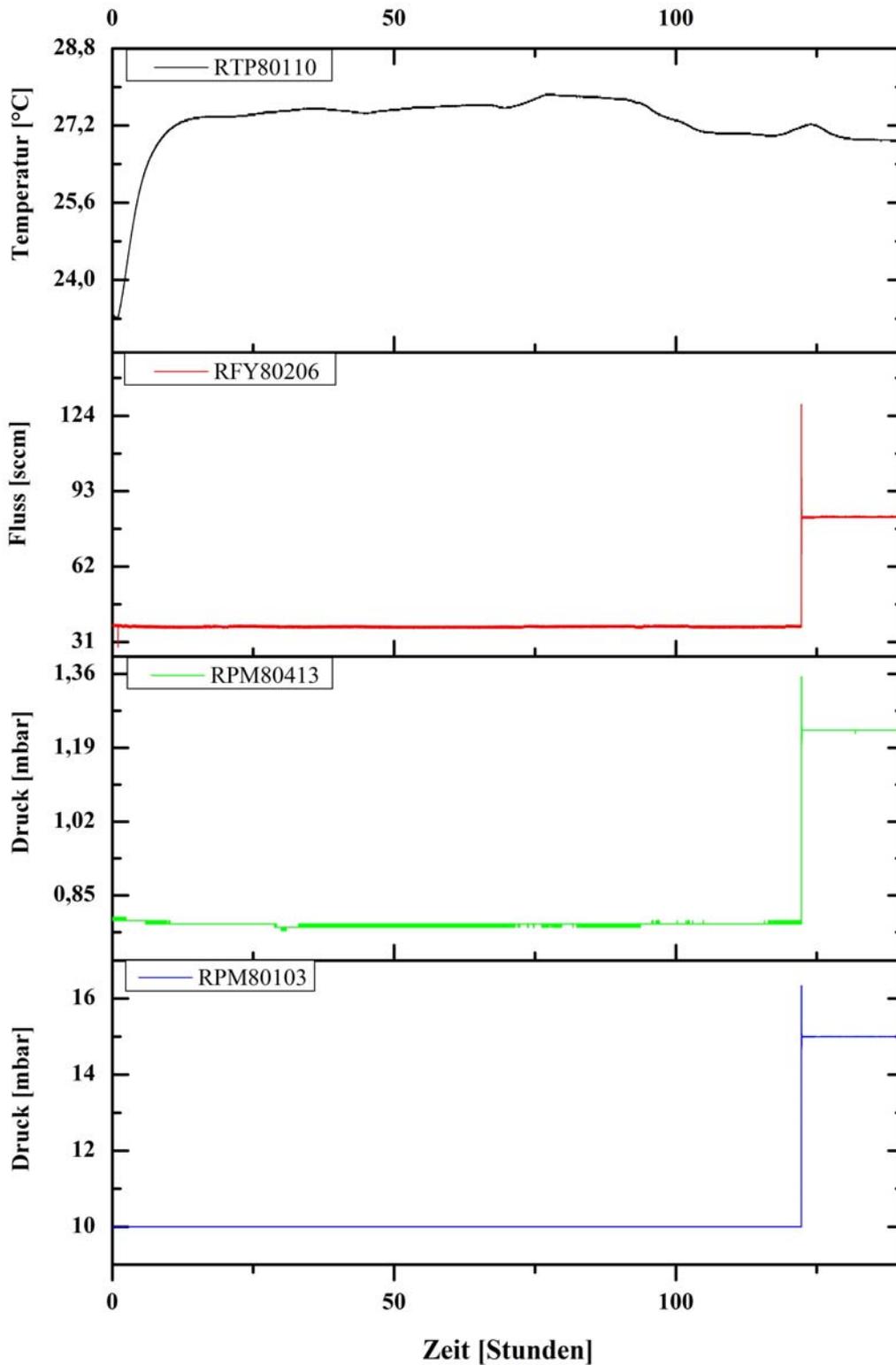
Einen Überblick der relevanten Daten gibt Abbildung 4.5. Darin dargestellt ist die komplette Laufzeit von Run 1. Bereits ohne Kenntnis statistischer Werte ist anhand des Signals von RPM80103 (blau) das Funktionieren der Druckstabilisierung zu erkennen. Einen detaillierten Blick auf die Druckschwankungen gibt Abbildung 4.4.

Deutlich zu erkennen ist anhand von Abbildung 4.5 auch das gute Funktionieren der Druckstabilisierung trotz eines Anstiegs der Temperatur des WGTS Puffer Behälters TBN80100 und sich anschließender Temperaturfluktuationen in diesem. Die Temperaturvariationen schlagen sich nicht im Messsignal des Drucks nieder (bei RPM80103 handelt es sich um einen temperaturstabilisierten Sensor, siehe Kapitel 3).

Aus Abbildung 4.4 ist zu erkennen, dass die aufgezeichneten Veränderungen im Druck gerade an der Digitalisierungsgrenze des verwendeten Analog-Digital-Konverters (ADC) liegen. Daher lässt dieses Signal keine Rückschlüsse auf kleinere Druckfluktuationen als  $\Delta p \approx 4 \cdot 10^{-3}$  mbar zu. Bei den Runs 2-5 liegt daher auch ein Augenmerk auf dem höher aufgelösten Drucksensor RPM80102, welcher ebenfalls am WGTS Pufferbehälter angeschlossen ist.



**Abbildung 4.4: Druckschwankungen an RPM80103 bei Sollwert  $p=10$  mbar und  $p=15$  mbar.** Dargestellt sind die Druckschwankungen im WGTS Pufferbehälter, links bei einem Sollwert von 10 mbar und rechts bei einem Sollwert von 15 mbar.



**Abbildung 4.5: Übersicht der Drücke, Temperaturen und Gasflüsse bei Run 1.**

Dargestellt sind der Druck im WGTS Pufferbehälter (blau) dessen Temperatur (schwarz) sowie der Fluss in diesen (rot). Außerdem ist noch der Zeitverlauf des Drucks nach der WGTS Attrappe (grün) abgebildet. Sollwertvorgabe war ca. 120 h lang 10 mbar, danach 15 mbar.

Es ergeben sich die statistischen Werte bei 10 mbar und 15 mbar nach Tabelle 4.3. Die Verteilung der aufgenommenen Werte kann Abbildung 4.6 entnommen werden.

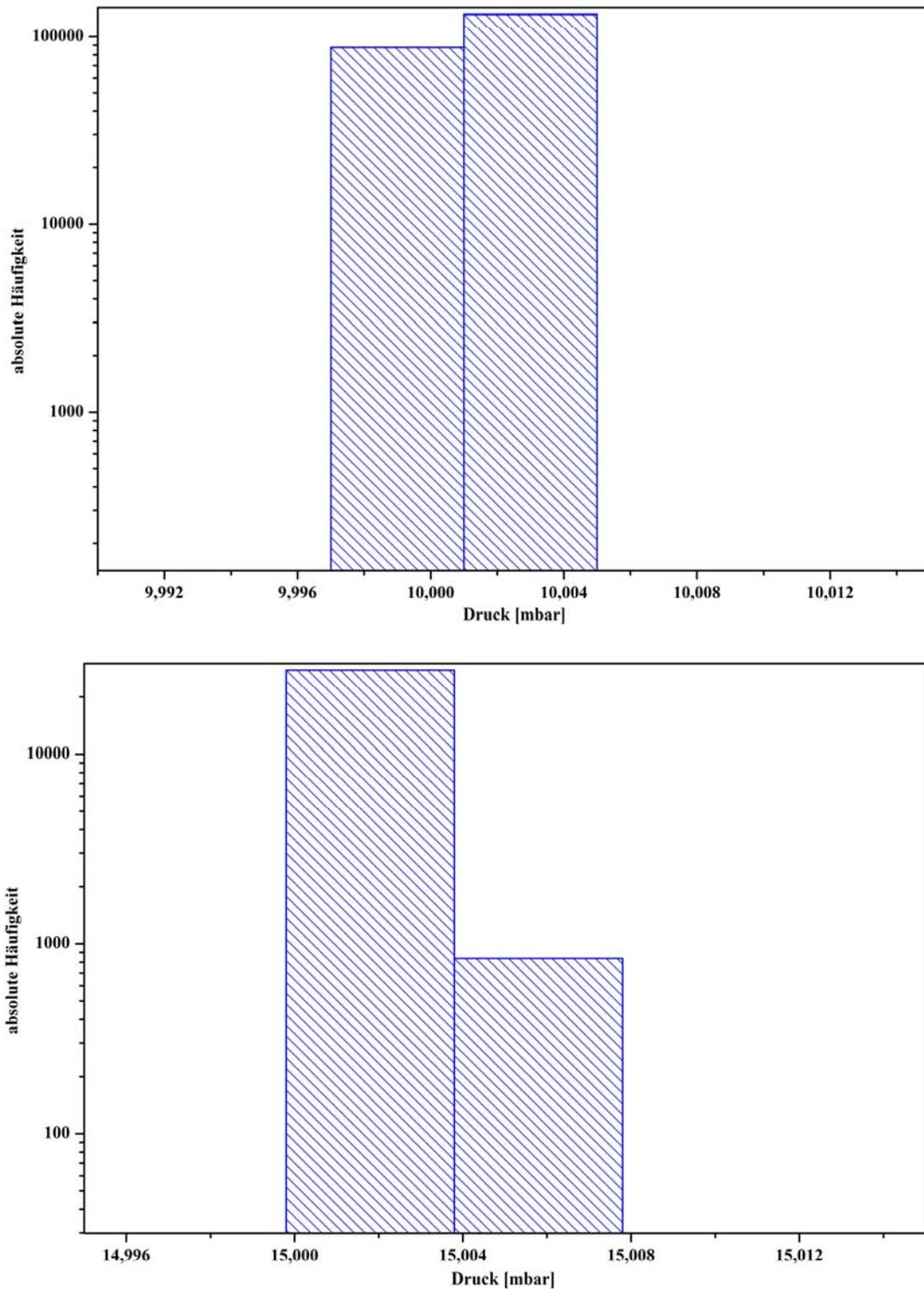
Aus Abbildung 4.6 ist außerdem ersichtlich, dass es sich bei der Verteilung der Messwerte nicht um ein gaußförmiges Profil handelt. Wie bereits erwähnt liefert der Sensor RPM80103 als „Messsignal“ nur das kippen des Analog-Digital-Konverters zwischen zwei Digitalisierungsstufen. Daher lässt sich für diese Messwerte auch kein Konfidenzlevel angeben, wie dies im Folgenden für den Sensor RPM80102 der Fall ist.

Sämtliche erhaltenen Ergebnisse liegen innerhalb der von KATRIN geforderten Ergebnisse von  $\Delta p < 0,1 \%$ . So liegen die erzielten Resultate bei einem Sollwert von 10 mbar um einen Faktor 4,25 unter den geforderten Mindestgrenzen. Bei einem Sollwert von 15 mbar ist das erzielte Resultat sogar um einen Faktor 6,8 besser als es die Designkriterien von KATRIN mindestens fordern.

**Tabelle 4.4: Statistische Parameter Run 1 bei 10 mbar und 15 mbar.**

Sensor	Anzahl Messpunkte	Mittelwert	Standardabweichung
RPM80103	220059	9,99999 mbar	0,00235 mbar
RFY80206	220059	37,273 sccm	0,202 sccm

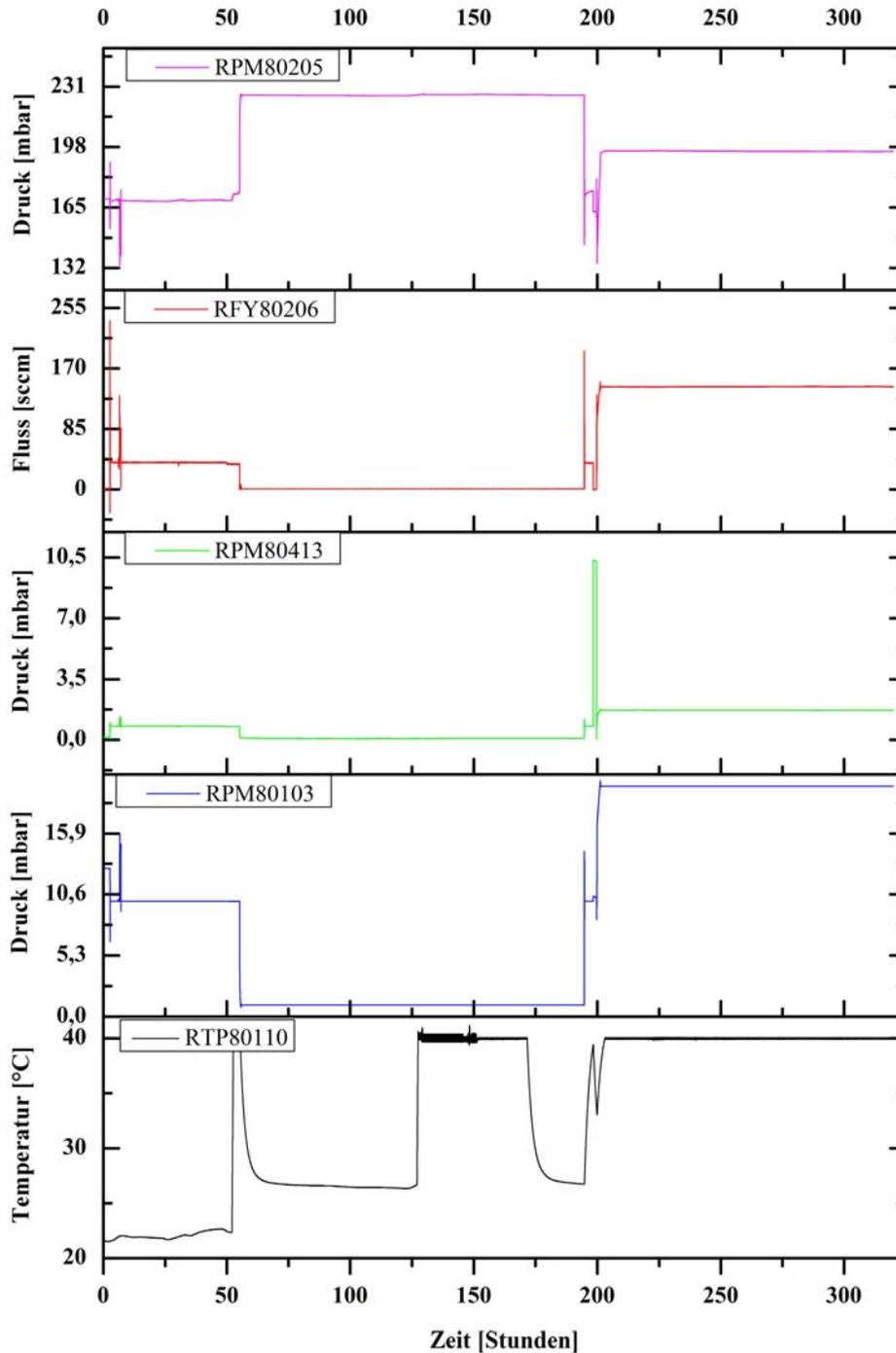
Sensor	Anzahl Messpunkte	Mittelwert	Standardabweichung
RPM80103	28542	15,00004 mbar	0,0022 mbar
RFY80206	28542	82,327 sccm	0,084 sccm



**Abbildung 4.6: Histogramm zur Druckverteilung im WGTS Pufferbehälter.**

Dargestellt ist die Verteilung der aufgenommenen Werte bei einem Sollwert von 10 mbar (oben) und 15 mbar (unten). Speziell bei 15 mbar Sollwert dominiert der errechnete Mittelwert. Die Klassenbreite entspricht der Auflösung des verwendeten ADC.

## 4.4 Der Stickstofftestlauf – Run 2

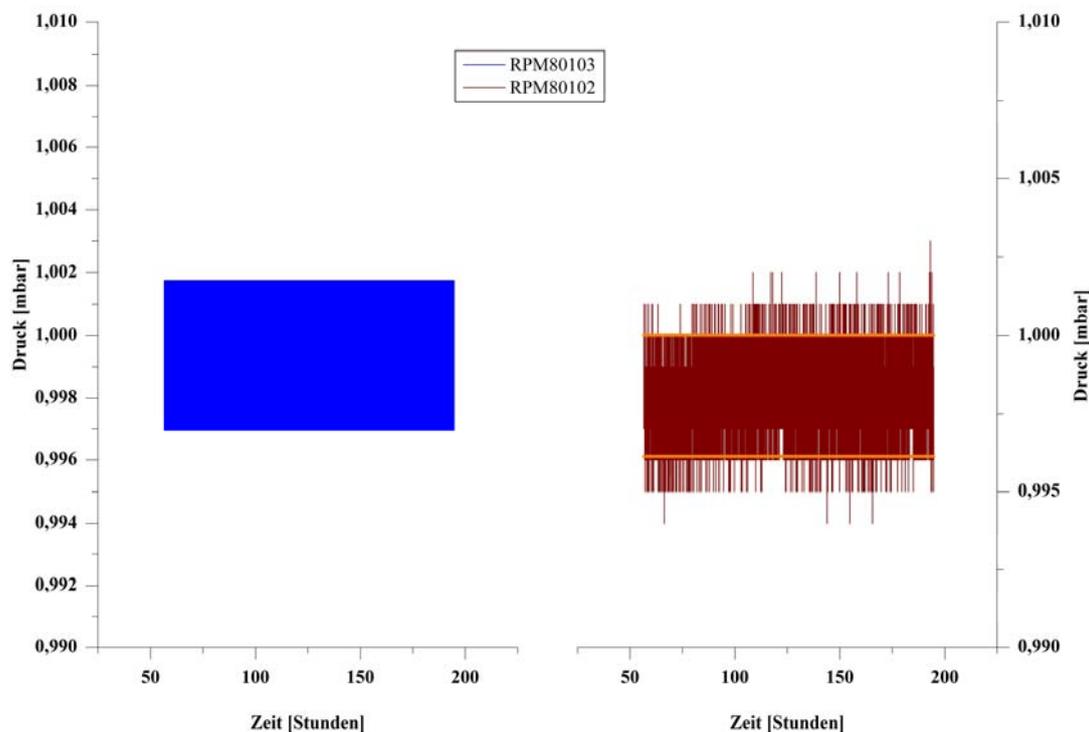


**Abbildung 4.7: Übersicht der Drücke, Temperaturen und Gasflüsse bei Run 2 (1-15mbar).** Dargestellt sind der Druck im WGTS Pufferbehälter (blau) dessen Temperatur (schwarz) sowie den Fluss in diesen (rot). Außerdem noch dargestellt ist der Druck nach der WGTS Attrappe (grün) sowie der Druck in TBN80200 (magenta). Der Sollwert betrug zu Anfang 10 mbar, wurde danach auf  $p = 1$  mbar verändert und abschließend auf  $p = 15$  mbar angehoben.

Abbildung 4.7 gibt eine Übersicht zu den bei Run 2 gemessenen Größen. Die Unterbrechung zu Run 1 wurde gemacht, um das komplette System neu anfahren zu können. Dies diente der Überprüfung, ob die erforderlichen Werte (insbesondere das Erreichen eines stabilen Drucks im WGTS Pufferbehälter) reproduzierbar erhalten werden.

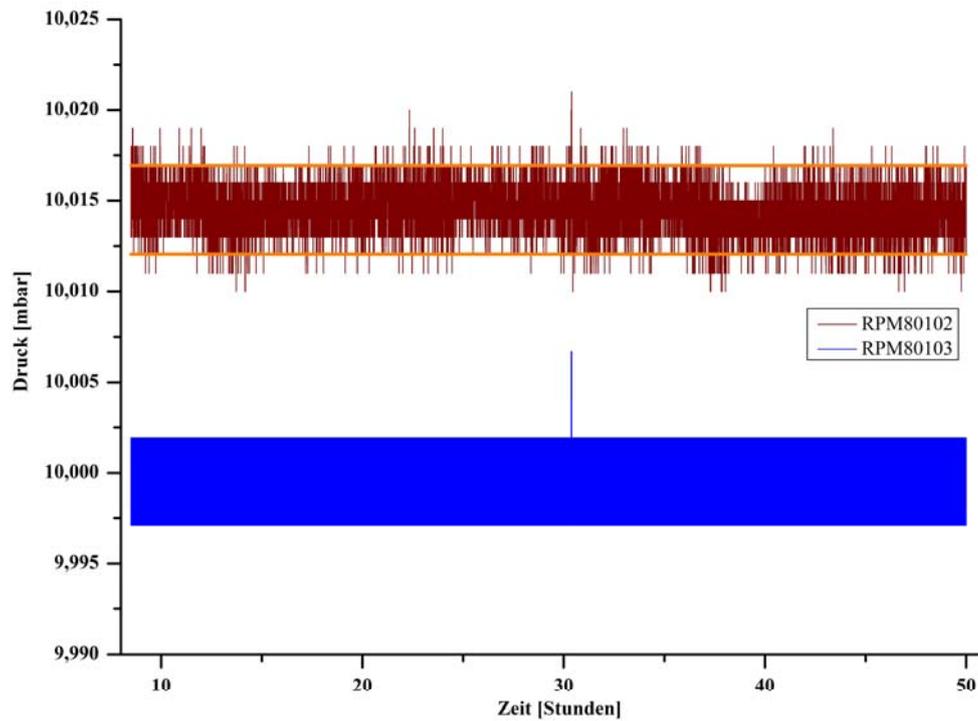
Im Rahmen der über 300 Stunden Messzeit wurden drei unterschiedlichen Drücke in TBN80100 angefahren, um ein Funktionieren der Regelung und der Regelparameter über einen weiten Bereich zu zeigen. Diese Bereiche sind in Abbildung 4.8 für 1 mbar, in Abbildung 4.9 für 10 mbar Sollwert und in Abbildung 4.10 für 20 mbar Sollwert im Detail für die beiden Sensoren RPM80102 und RPM80103 dargestellt. Daneben wurden die bereits in Kapitel 4.1 präsentierten, optimierten Regelparameter der Temperatur für den WGTS Pufferbehälter TBN80100 in Run 2 ermittelt (detailliert siehe Abbildung 4.2)

Die dazugehörigen statistischen Werte sind in Tabelle 4.4 wiedergegeben. Neben den Kenngrößen der beiden Drucksensoren finden sich an dieser Stelle auch Angaben zum Gasfluss vom Pufferbehälter TBN80200 in den WGTS Pufferbehälter TBN80100, also auch den zu erwartenden Fluss durch die LARA Messzelle.

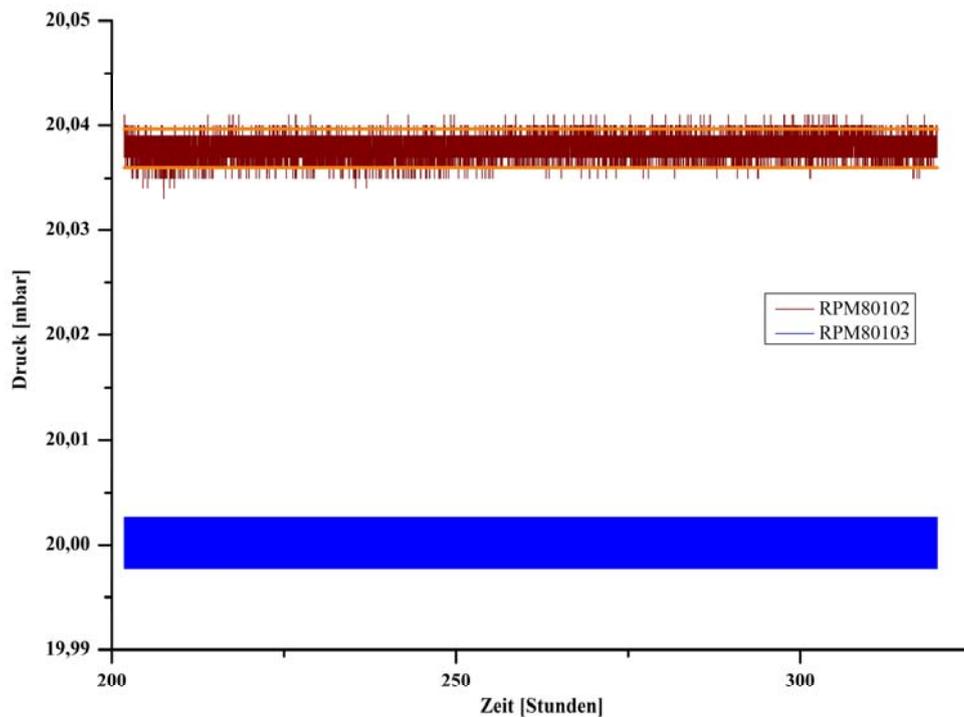


**Abbildung 4.8: Druckschwankungen Run 2 an RPM80103 und RPM80102 bei 1 mbar.**

Dargestellt sind die Druckschwankungen im WGTS Pufferbehälter, bei einem Sollwert von 1 mbar (RPM80102: braun, RPM80103: blau) In orange eingezeichnet ist das  $2\sigma$  C.L.



**Abbildung 4.9: Druckschwankungen Run 2 an RPM80103 und RPM80102 bei 10 mbar.** Dargestellt sind die Druckschwankungen im WGTS Pufferbehälter bei einem Sollwert von 10 mbar. In orange eingezeichnet ist das  $2\sigma$  C.L.



**Abbildung 4.10: Druckschwankungen Run 2 an RPM80103 und RPM80102 bei 20 mbar.** Dargestellt sind die Druckschwankungen im WGTS Pufferbehälter bei einem Sollwert von 20 mbar. In orange eingezeichnet ist das  $2\sigma$  C.L.

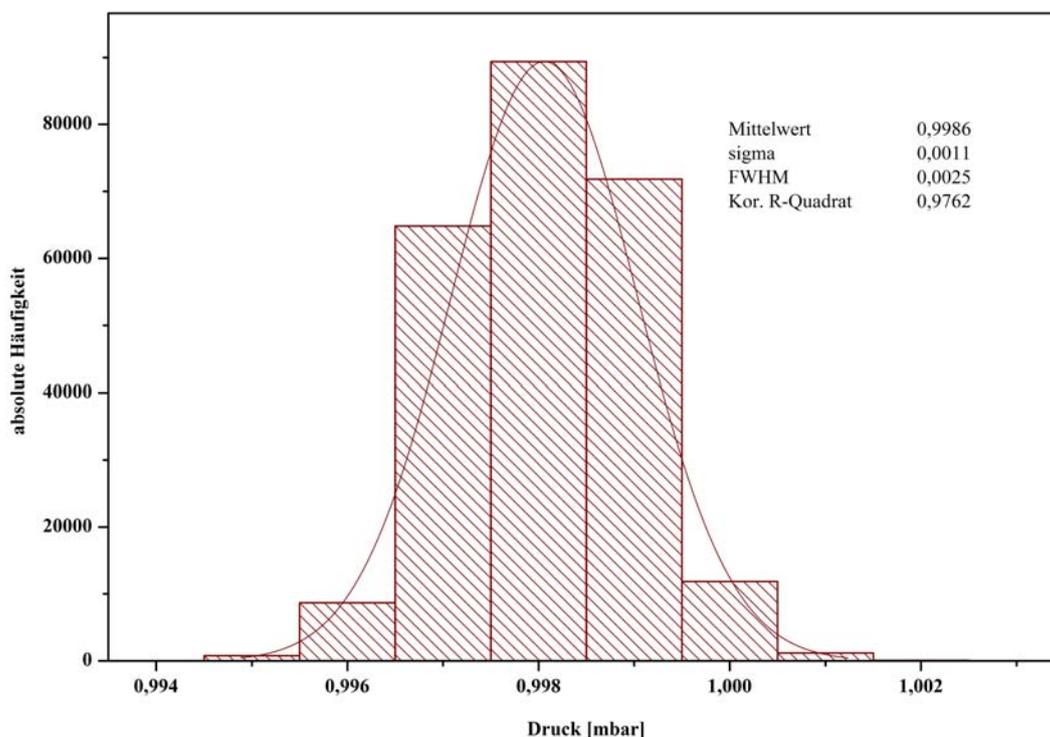
**Tabelle 4.5: Statistische Parameter Run 2 bei 1, 10 und 20 mbar.**

Sensor	Anzahl Messpunkte	Mittelwert	Standardabweichung
RPM80103	248653	0,999 mbar	0,002 mbar
RPM80102	248653	0,9981 mbar	$9,76 \cdot 10^{-4}$ mbar
RFY80206	248653	0,51 sccm	0,05 sccm

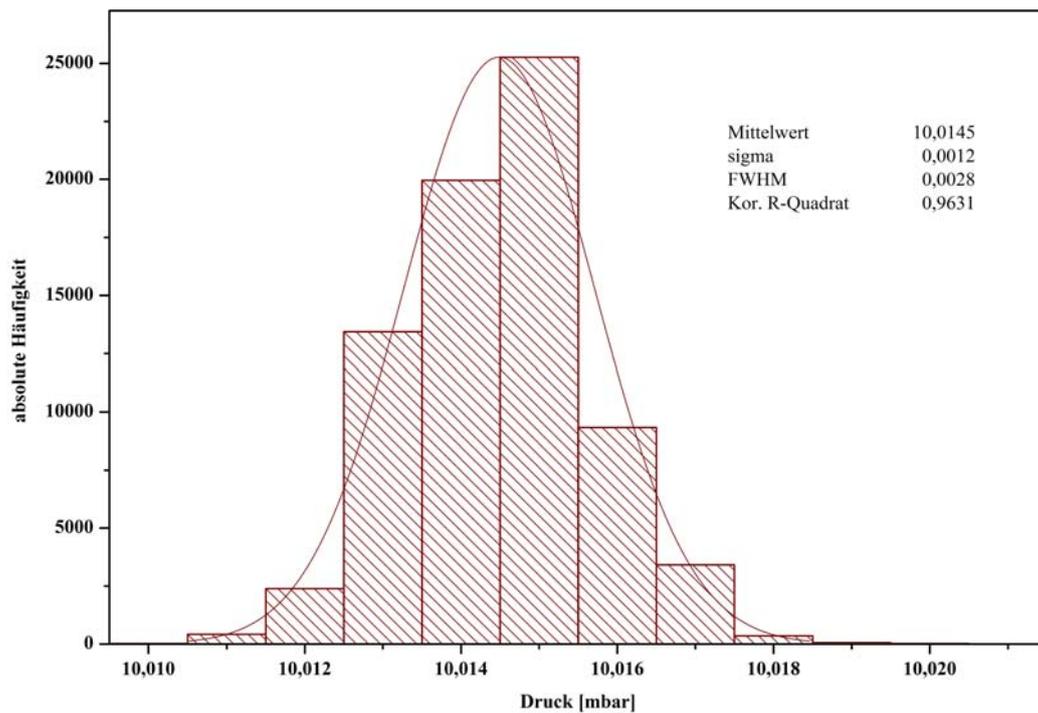
Sensor	Anzahl Messpunkte	Mittelwert	Standardabweichung
RPM80103	74701	10,000 mbar	0,002 mbar
RPM80102	74701	10,015 mbar	0,0012 mbar
RFY80206	74701	38,0 sccm	0,3 sccm

Sensor	Anzahl Messpunkte	Mittelwert	Standardabweichung
RPM80103	212540	19,999 mbar	0,002 mbar
RPM80102	212540	20,0378 mbar	$9,10 \cdot 10^{-4}$ mbar
RFY80206	212540	144,4 sccm	0,2 sccm

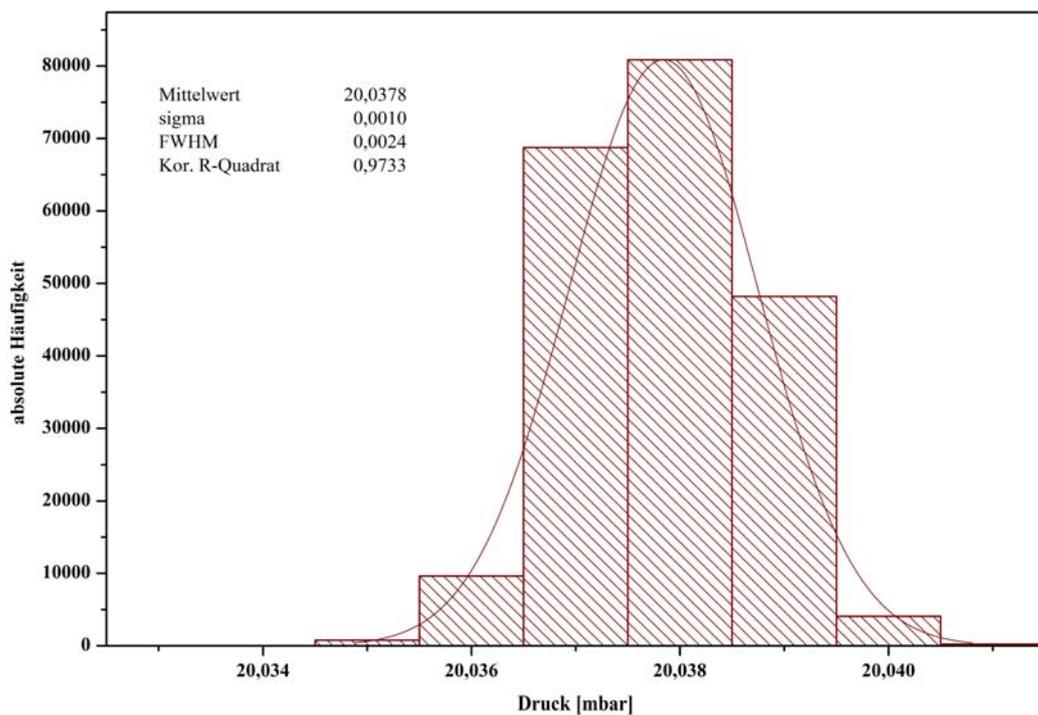
Die beiden in Abbildung 4.8 bis Abbildung 4.10 dargestellten Drucksensoren RPM80102 (braun) und RPM80103 (blau) zeigen gleiche zeitliche Konstanz und unterscheiden sich lediglich bezüglich ihres Offsets. Da RPM80102 jedoch eine höhere Auflösung am Analog-Digital Konverter besitzt (siehe Anhang), sollen im Folgenden die Verteilung der erhaltenen Messwerte nur für diesen dargestellt werden.

**Abbildung 4.11: Histogramm Run 2 Drucksensor RPM80102 bei 1 mbar Sollwert.**

Dargestellt ist die Verteilung der Messwerte bei einem eingestellten Sollwert von 1 mbar. Zusätzlich wurde ein Gauß-Fit angebracht. Die Klassenbreite entspricht der Sensorauflösung.



**Abbildung 4.12: Histogramm Run 2 Drucksensor RPM80102 bei 10 mbar Sollwert.**  
 Dargestellt ist die Verteilung der Messwerte bei einem eingestellten Sollwert von 10 mbar. Zusätzlich wurde ein Gauß-Fit angebracht. Die Klassenbreite entspricht der Sensorauflösung.



**Abbildung 4.13: Histogramm Run 2 Drucksensor RPM80102 bei 20 mbar Sollwert.**  
 Dargestellt ist die Verteilung der Messwerte bei einem eingestellten Sollwert von 20 mbar. Zusätzlich wurde ein Gauß-Fit angebracht. Die Klassenbreite entspricht der Sensorauflösung.

Die Drücke aller drei Druckbereiche sind erwartungsgemäß gaußverteilt um den errechneten Mittelwert. Es existieren keine weiteren bevorzugten Drücke neben dem eingestellten Sollwert innerhalb der Auflösungsgenauigkeit.

Im Rahmen von Run 2 wurde das Einschwingverhalten des Drucks in TBN80100 ermittelt. Dieses hängt natürlich maßgeblich von den eingestellten Regelparametern ab, welche auch in Betracht auf eine möglichst kurze Einschwingphase hin optimiert wurden.

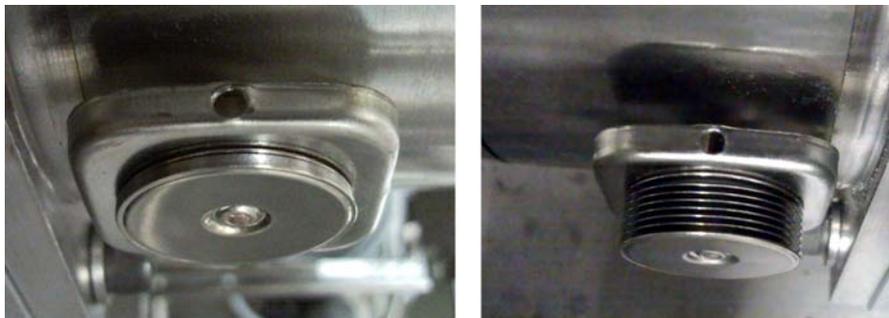
Die erzielten Resultate in Run 2 liegen wiederum alle innerhalb der Erfordernisse des KATRIN Designreports. Bei einem Sollwert von 1 mbar wird die Anforderung nach einer 0,1 % Stabilität gerade erreicht. Bei einem Sollwert von 10 mbar zeigen die Werte eine Verbesserung um einen Faktor 8,3, bei 20 mbar Sollwert erfüllt die Druckstabilisierung die Anforderungen sogar um einen Faktor 22 besser als mindestens gefordert.

## 4.5 Die Deuteriumtestläufe (Run 3 bis Run 5)

Die bisherigen Testläufe Run 1 und Run 2 wurden aus den genannten Gründen mit Stickstoff ( $N_2$ ) durchgeführt. Um näher an die tatsächlichen Bedingungen im Betrieb mit Tritium zu kommen ohne das System zu kontaminieren, wurden sämtliche nachfolgende Runs mit Deuterium ( $D_2$ ) durchgeführt.

### 4.5.1 Deuteriumtestlauf – Run 3

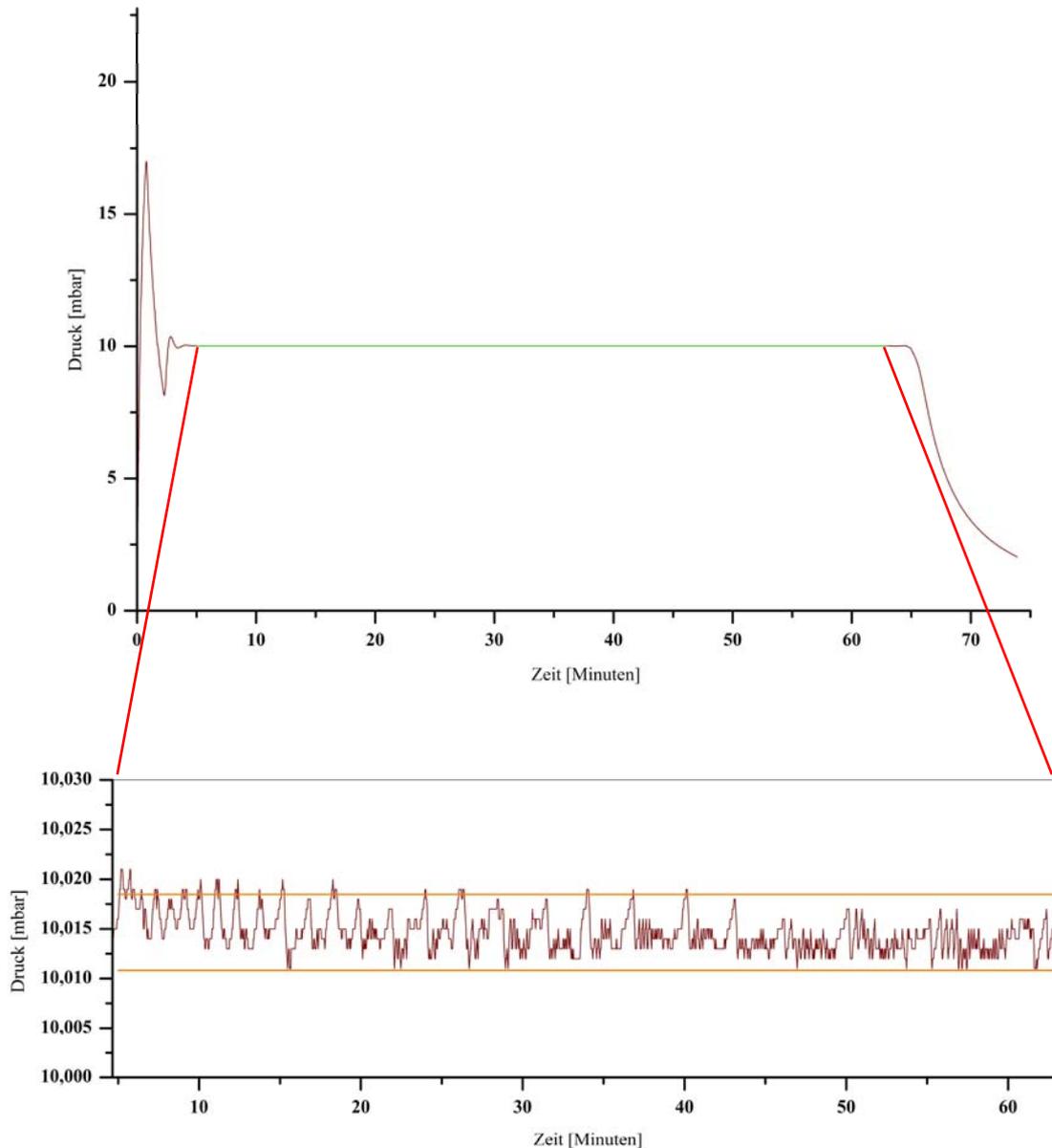
Run 3 lief aufgrund eines Pumpenbalgbruchs (Abbildung 4.14) an einer der vier Metal Bellows Pumpen nur ca. eine Stunde. Dabei wurde das erste Mal erfolgreich Deuterium bei einem Sollwert von 10 mbar zirkuliert. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Da es sich nur um einen sehr kurzen Testlauf handelt, soll auf die Betrachtung von weiteren Kenngrößen neben dem Druck im WGTS Pufferbehälter verzichtet werden.



**Abbildung 4.14: Balgbruchindikator einer Metal Bellows Pumpe.**

Links dargestellt ist die Balgbruchanzeige ohne Auslösung (keine Belüftung eines kleinen Metallbalgs), rechts eine ausgelöste Balgbruchanzeige (kleiner Metallbalg belüftet).

Da sich die defekte Pumpe im Vakuumsystem des Inner Loops befand, konnten die Vakuua der Permeatoren nicht aufrecht erhalten werden. Dies liegt an der hohen Permeationsfähigkeit von Wasserstoff (-isotopen) durch Edelstahl. Daher würde ein rascher Druckanstieg im Isolationsvakuum des Circulation Loop Permeators (FLM80300) und damit eine Auslösung eines sicheren Zustands A erfolgen. Um dies zu vermeiden wurde der komplette Betrieb gestoppt, der Loop evakuiert und die Pumpe ausgetauscht.



**Abbildung 4.15: Druckverlauf von RPM80102 bei Run 3.**

Das Diagramm zeigt den Druckverlauf im WGTS Pufferbehälter TBN80100 über einen Zeitraum von ca. einer Stunde. Der im oberen Diagramm grün markierte Bereich ist unten vergrößert dargestellt. Ebenfalls eingezeichnet sind unten die  $2\sigma$  Grenzen (orange).

**Tabelle 4.6: Statistische Parameter Run 3 bei 10 mbar.**

Sensor	Anzahl Messpunkte	Mittelwert	Standardabweichung
RPM80103	1741	10,001 mbar	0,002 mbar
RPM80102	1741	10,0145 mbar	0,0019 mbar
RFY80206	1741	54,0 sccm	0,3 sccm

Trotzdem zeigte dieser kurze Testlauf, dass die Regelung samt den gefundenen Regelparametern nicht nur mit Stickstoff sondern auch mit Deuterium zufriedenstellend arbeitet. Die ermittelten statistischen Kenngrößen sind in Tabelle 4.5 wieder gegeben und befinden sich ebenfalls wieder weit innerhalb der erforderlichen Grenzen (Faktor 5,3). Jedoch ist Run 3 aufgrund seiner Kürze weit weniger aussagekräftig als die restlichen Run's.

#### 4.5.2 Deuteriumtestlauf – Run 4

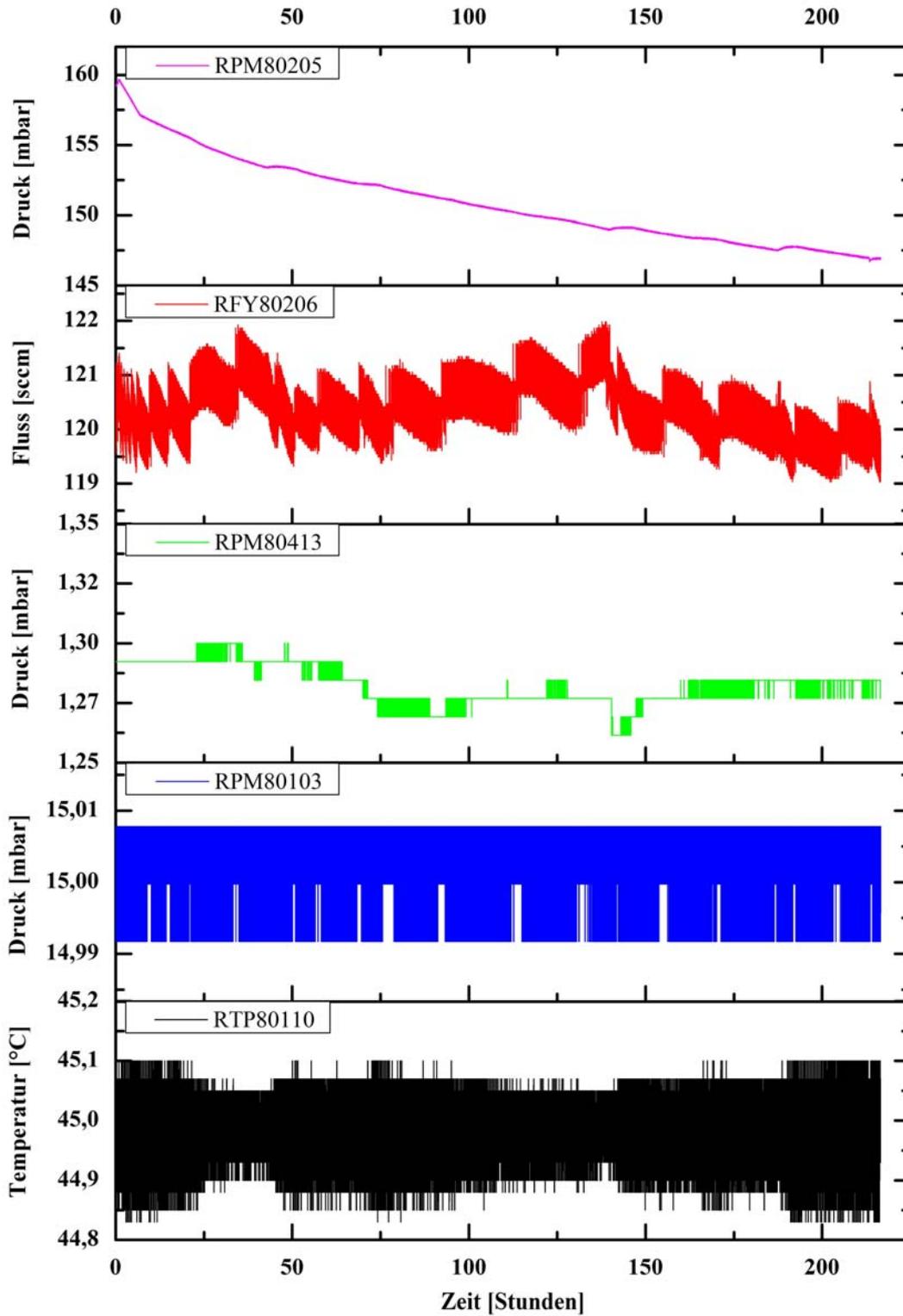
Nach der Reparatur der defekten Pumpe (Standzeit des Systems ca. 14 Tage) wurde ein erneuter Run mit Deuterium gestartet.

Über die gesamte Messzeit von ca. 220 Stunden wurde der WGTS Pufferbehälter temperaturstabilisiert betrieben. Einen Überblick über die erhaltenen Resultate gibt Abbildung 4.16, eine detaillierte Sicht auf den Verlauf des Drucks in TBN80100 ist in Abbildung 4.17 gegeben.

Auf ein Variieren des Sollwertes wurde innerhalb dieses Zeitraums bewusst verzichtet, da mit diesem Run die Langzeitstabilität des Gesamtsystems gezeigt werden sollte. Beendet wurde Run 4 durch einen Sicheren Zustand (A5), ausgelöst vom sich in der gleichen Handschuhbox befindlichen Telexperiment Loopino<sup>(1)</sup>, welcher ebenfalls Komponenten innerhalb des Circulation Loops beeinflusst.

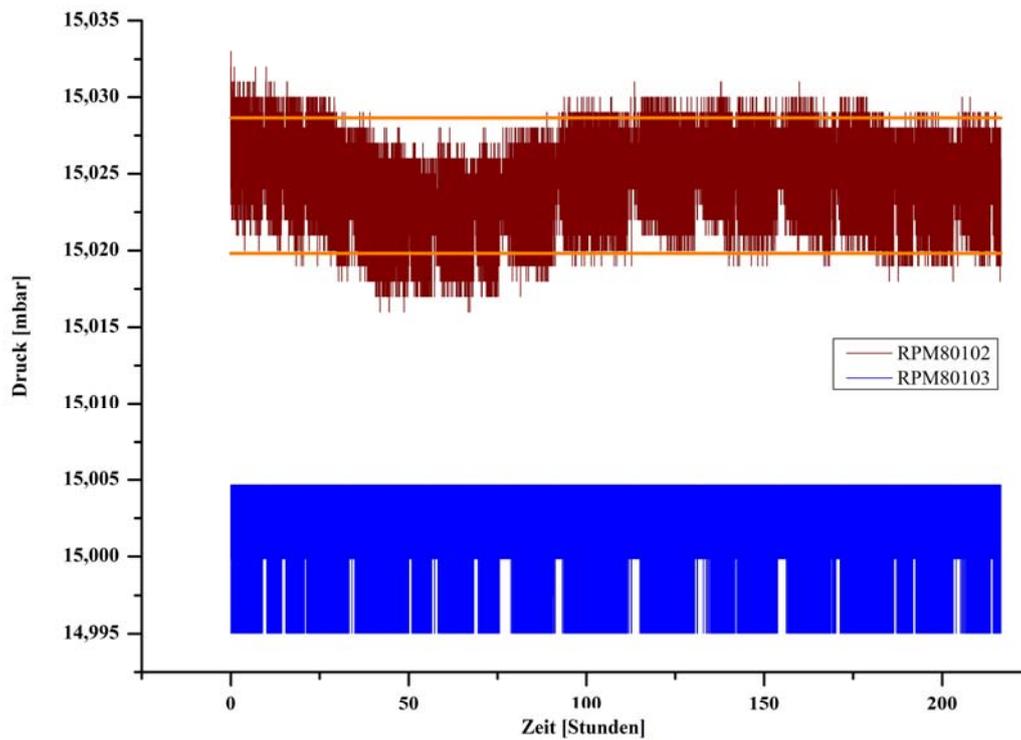
Der Druckabfall an RPM80205 rührt von der Tatsache her, dass in diesem Lauf das erste Mal mit dem Circulation Loop Permeator gearbeitet wurde. Über die Laufzeit von ca. 225 Stunden erfolgte eine Reinigung des Gasinventars. Dieses löst auf seinem Weg durch das Leitungssystem Kohlenwasserstoffe aus den Rohrrinnenseiten und transportiert diese mit sich. Vor dem Permeator stauen sich diese auf, stehen also nicht mehr zur Aufrechterhaltung des Drucks in TBN80200 zur Verfügung. Aus diesem Grund ist für den späteren Betrieb auch eine kontinuierliche Nachführung von Gas in den Tritium Pufferbehälter TBN80200 vorgesehen.

(1) Loopino besitzt einen ähnlichen (wenn auch verkleinerten) Aufbau wie der eigentliche Circulation Loop und dient der Verifikation des Regelsystems des Circulation Loops. Loopino wird voraussichtlich Anfang 2010 mit Tritiumgas getestet, während der restliche Aufbau bis zum Start von KATRIN inaktiv betrieben wird.

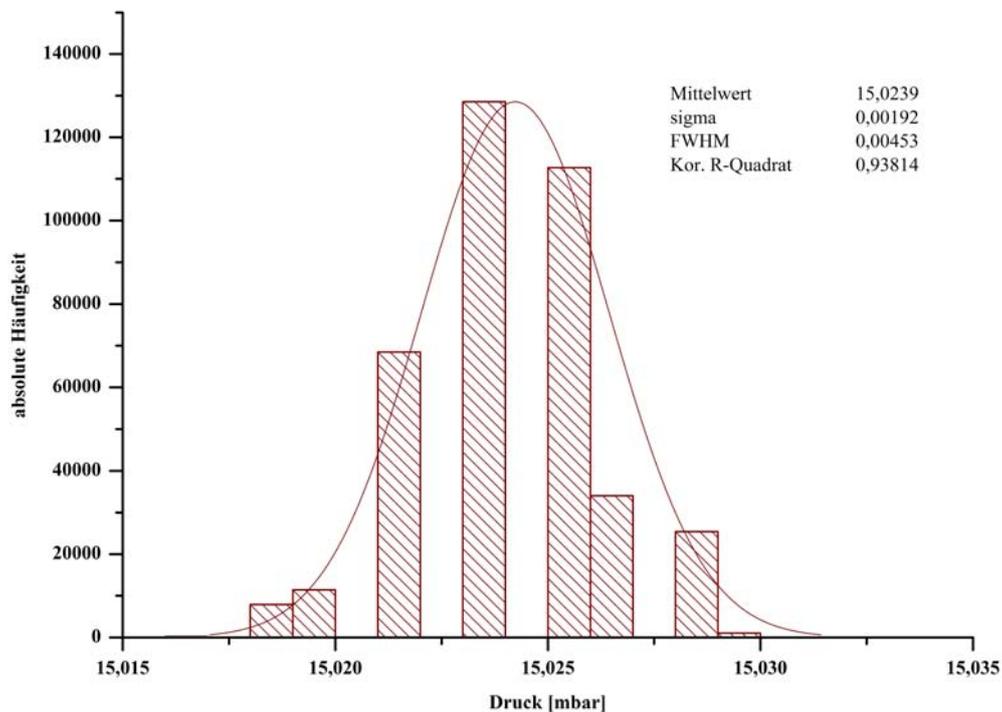


**Abbildung 4.16: Übersicht der Drücke, Temperaturen und Gasflüsse bei Run 4.**

Dargestellt sind der Druck im WGTS Pufferbehälter (blau) dessen Temperatur (schwarz) sowie den Fluss in diesen (rot). Außerdem dargestellt ist der Druck nach der WGTS Attrappe (grün) sowie der Druck in TBN80200 (magenta). Der eingestellte Sollwert war  $p = 15$  mbar.



**Abbildung 4.17: Druckschwankungen Run 4 an RPM80103 und RPM80102 bei 15 mbar.** Dargestellt sind die Druckschwankungen im WGTS Pufferbehälter bei einem Sollwert von 15 mbar. Die Ursache des „Dips“ bei  $t=50$  h ist ungeklärt. Orange eingezeichnet ist das  $2\sigma$  C.L.



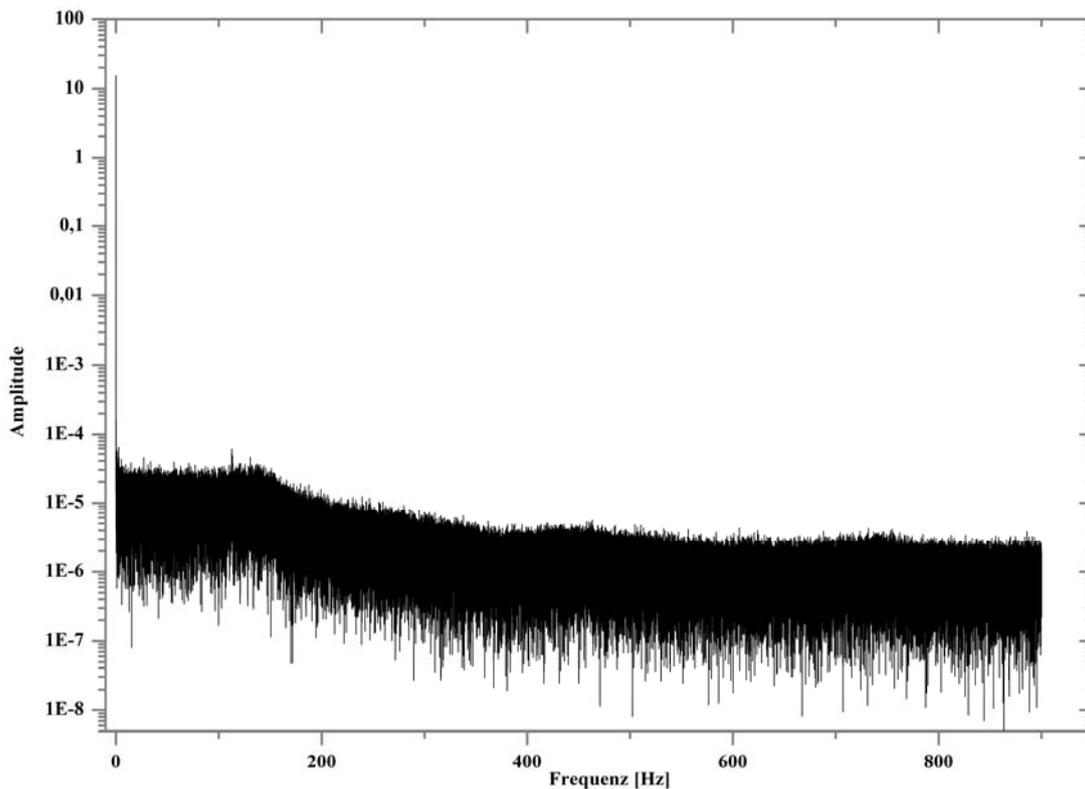
**Abbildung 4.18: Histogramm Run 4 Drucksensor RPM80102 bei 15 mbar Sollwert.** Dargestellt ist die Verteilung der Messwerte bei einem eingestellten Sollwert von 15 mbar. Zusätzlich wurde ein Gauß-Fit angebracht. Die Klassenbreite entspricht der Sensorauflösung.

**Tabelle 4.7: Statistische Parameter Run 4 bei 15 mbar.**

Sensor	Anzahl Messpunkte	Mittelwert	Standardabweichung
RPM80103	389755	15,000 mbar	0,002 mbar
RPM80102	389755	15,024 mbar	0,002 mbar
RFY80206	389755	120,4 sccm	0,5 sccm

Die ermittelten statistischen Kenngrößen zu Druck und Gasdurchfluss ergeben sich nach Tabelle 4.6. Die Druckschwankungen sind auch hier um einen Faktor 7,5 kleiner als mindestens gefordert.

Abbildung 4.18 zeigt die Fouriertransformation in den Frequenzbereich der Messwerte des Drucks im WGTS Tritium Puffer. Neben einem maximalen Peak bei 0 Hz, welcher dem Mittelwert des Drucks entspricht, sind keine auffälligen Frequenzen auszumachen. Ab ca. 150 Hz erfolgt ein dem 1/f Rauschen entsprechender Abfall bis ca. 400 Hz [Det06]. Die Amplitude im Bereich bis ca. 150 Hz entspricht einer Dämpfung von ca. -100 dB, wodurch bereits dieser als nicht mehr signifikant zu bezeichnen ist und fällt weiter auf ca. -150 dB bei höheren Frequenzen (siehe Anhang D). Ausgeprägte Peaks bei 50 Hz und 100 Hz (Netzspannung) sind ebenfalls nicht zu erkennen.

**Abbildung 4.19: Fouriertransformation der Messwerte von RPM80102 bei Run 4.**

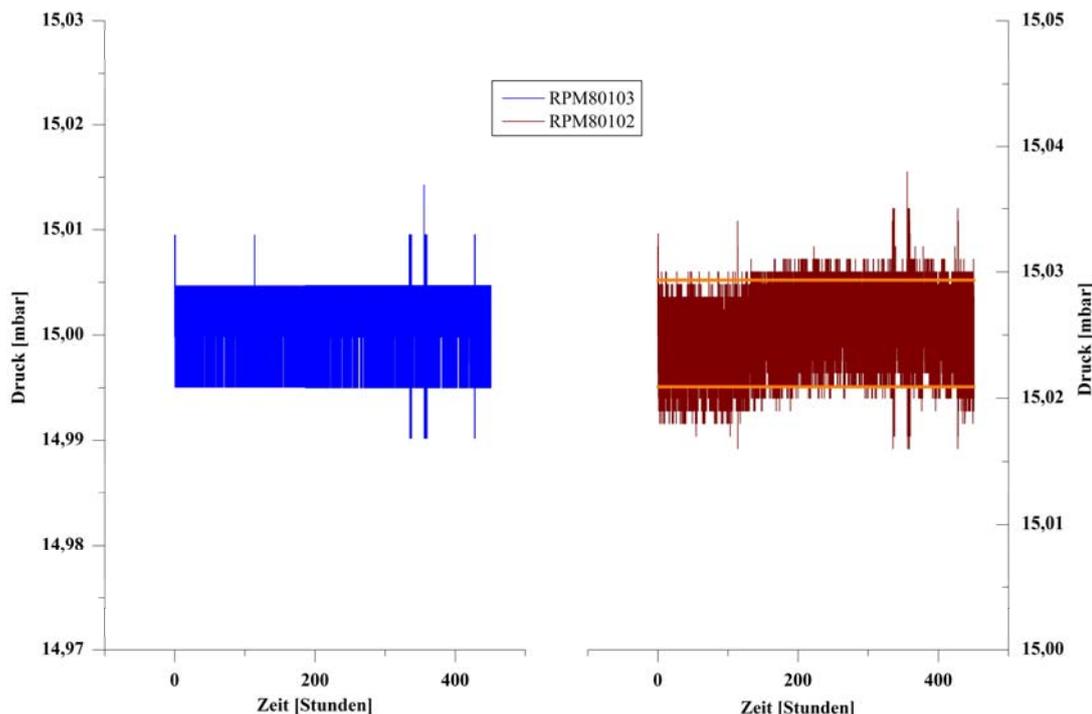
Dargestellt ist die Fouriertransformation der Messwerte von RPM80102 über die gesamte Dauer von Run 4. Neben einem für elektronisches Rauschen typischen, leichten Abfall ab ca. 150 Hz finden sich keine ausgeprägten Frequenzen im Spektrum. Sämtliche Werte liegen unter einer Amplitude von  $10^{-4}$  und sind daher als nicht signifikant zu beurteilen.

### 4.5.3 Deuteriumtestlauf – Run 5

Wie im vorangegangenen Kapitel 4.4.3 bereits erwähnt, trennt Run 4 und Run 5 lediglich eine Pause von ca. einer Stunde, bedingt durch einen sicheren Zustand ausgehend von Loopino. Da nichts an Hard- und Software verändert wurde, kann Run 4 und Run 5 prinzipiell als ein Run betrachtet werden. Neben der zeitlichen Trennung stand außerdem nun auch die Heizung der WGTS Attrappe (Dummy-Rohr, „Mock-up“) zur Verfügung (Netzteil der Heizung im Schaltschrank).

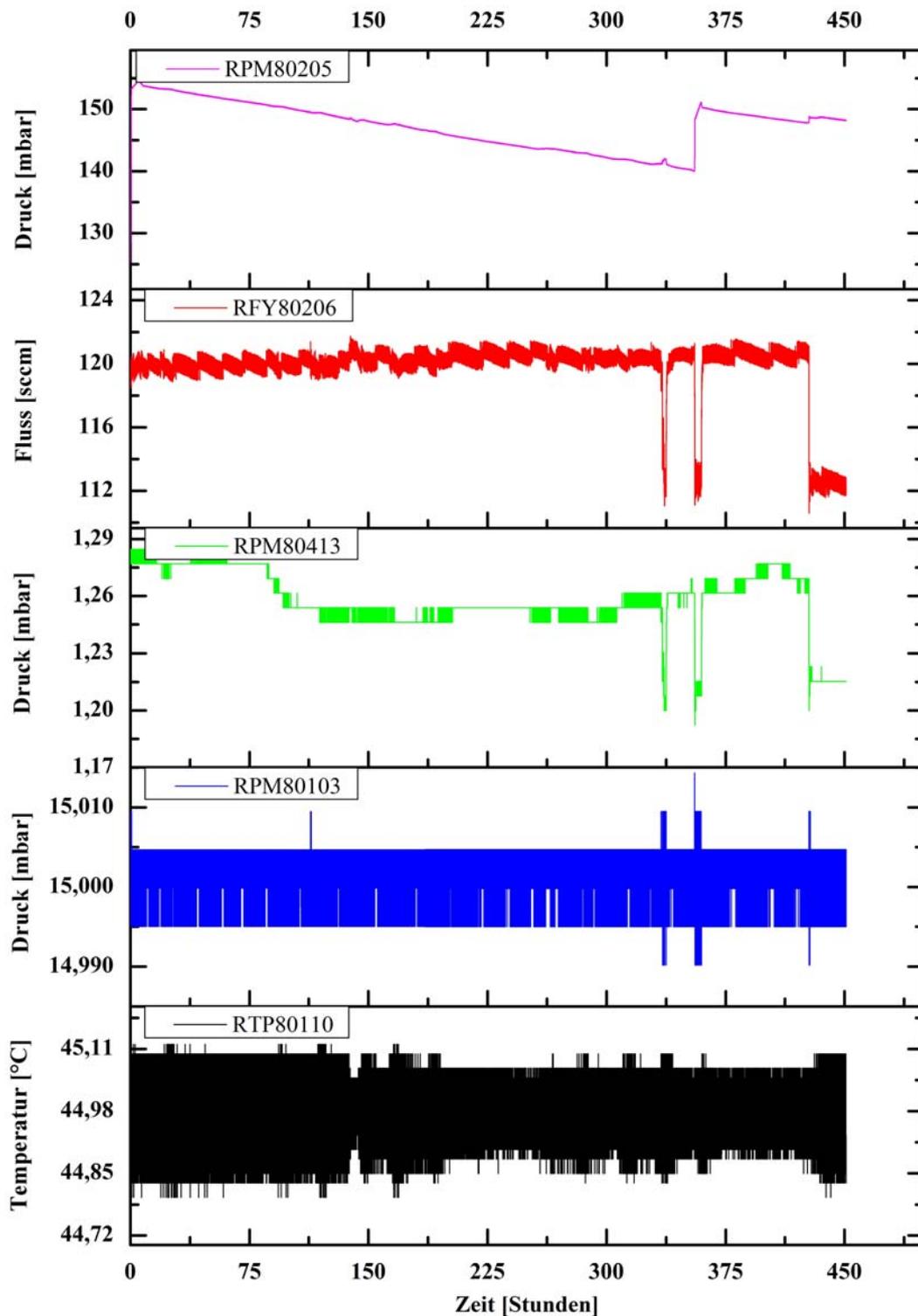
In Run 5 wurden ebenfalls die Regelparameter für die neu zur Verfügung stehende WGTS Attrappen-Heizung ermittelt. Eine detailliertere Darstellung der erhaltenen Ergebnisse erfolgt in Kapitel 4.5.2.

Eine komplette Übersicht über die erhaltenen Werte gibt Abbildung 4.21. In Abbildung 4.20 sind die beiden Drucksensoren am WGTS Pufferbehälter TBN80100 detailliert dargestellt. Die dazugehörigen statistischen Werte sind in Tabelle 4.7 wiedergegeben.



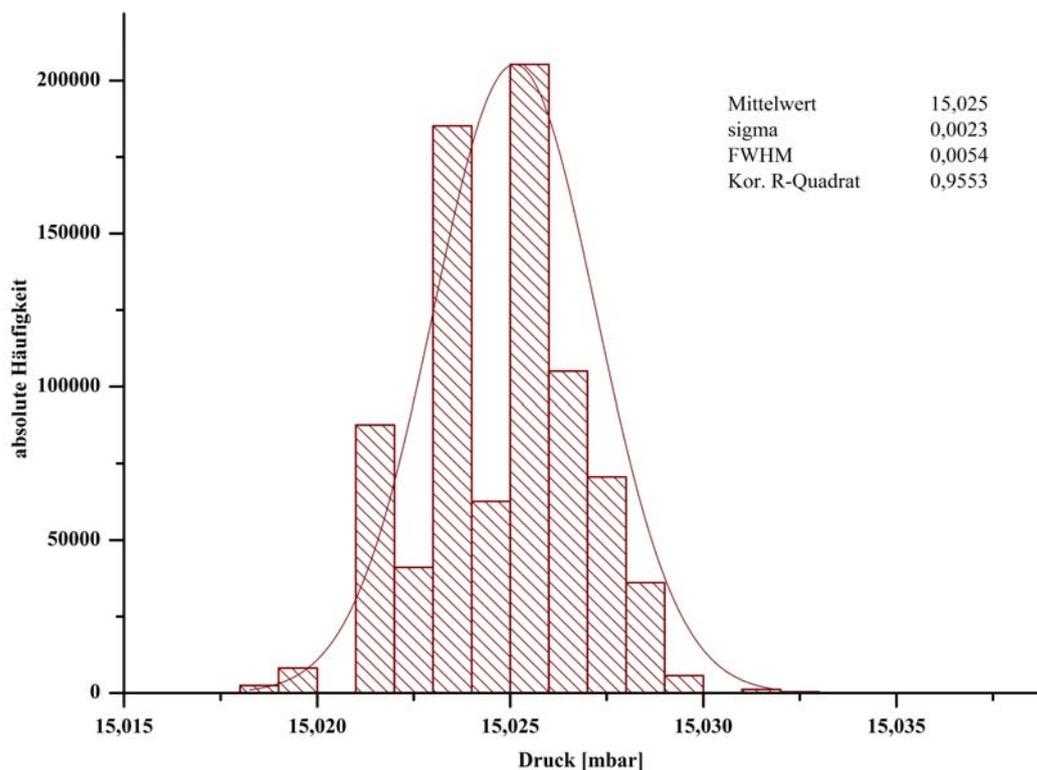
**Abbildung 4.20: Druckschwankungen an RPM80103 und RPM80102 bei 15 mbar.**

Dargestellt sind die Druckschwankungen im WGTS Pufferbehälter, bei einem Sollwert von 15 mbar (RPM80102: braun, RPM80103: blau). In orange eingezeichnet ist das  $2 \sigma$  C.L.



**Abbildung 4.21: Übersicht der Drücke, Temperaturen und Gasflüsse bei Run 5.**

Dargestellt sind der Druck im WGTS Pufferbehälter (blau) dessen Temperatur (schwarz) sowie den Fluss in diesen (rot). Außerdem der Druck nach der WGTS Attrappe (grün) sowie der Druck in TBN80200 (magenta). Der Sollwert betrug  $p = 15$  mbar.



**Abbildung 4.22: Histogramm Drucksensor RPM80102 bei 15 mbar Sollwert.**

Dargestellt ist die Verteilung der Messwerte bei einem eingestellten Sollwert von 15 mbar. Zusätzlich wurde ein Gauß-Fit angebracht. Die Klassenbreite entspricht der Sensorauflösung.

Die statistische Verteilung ist in Abbildung 4.22 dargestellt. Wie bereits in allen vorangegangenen Runs gezeigt, findet sich auch hier eine gaußförmige Verteilung der Messwerte wieder.

Vergleicht man die Fouriertransformation aus Abbildung 4.23 mit derjenigen von Run 4 (Abbildung 4.19), so lassen sich keine aussagekräftigen Unterschiede erkennen. Wie bereits erwähnt, wurde weder Hard- noch Software zwischen Run 4 und Run 5 geändert, daher ist dieses Ergebnis zu erwarten. Es kann also vermutet werden, dass ein Stoppen und erneutes Anfahren des Systems zu keinen Änderungen in den Regeleigenschaften führt.

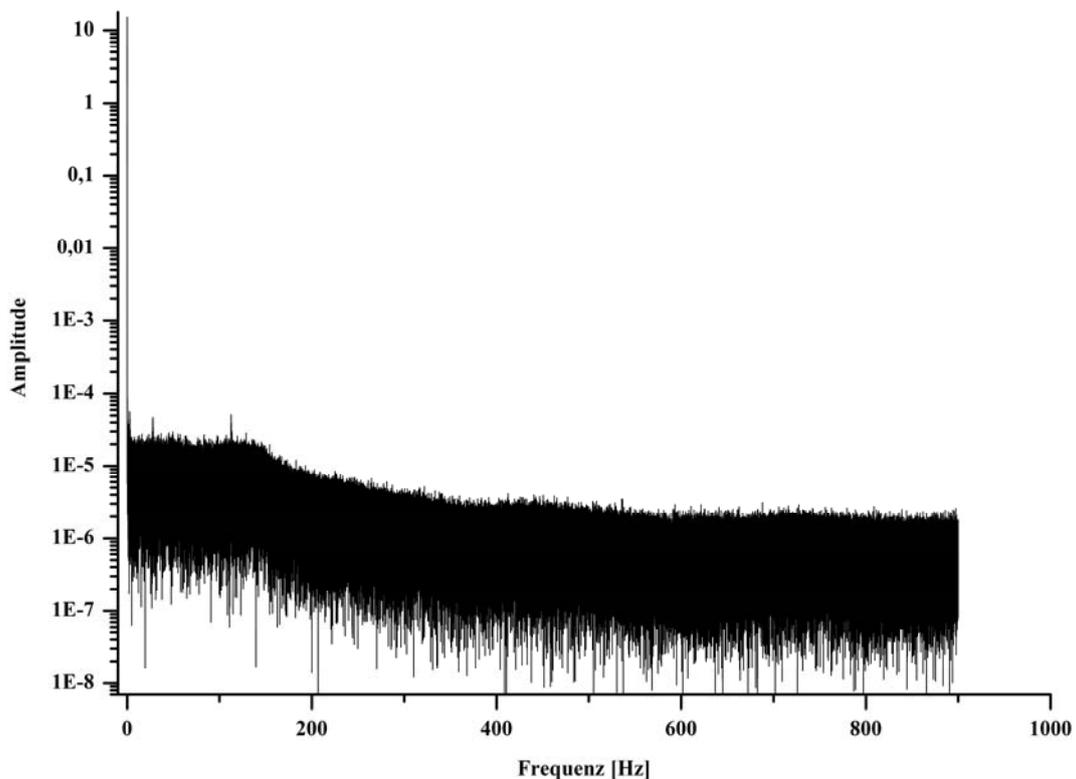
Da es sich bei Run 4 und Run 5 zusammengenommen um etwa 680 Stunden Laufzeit handelt (also fast einen kompletten Monat), kann aus den Ergebnissen

**Tabelle 4.8: Statistische Parameter Run 5 bei 15 mbar.**

Sensor	Anzahl Messpunkte	Mittelwert	Standardabweichung
RPM80103	812700	15,000 mbar	0,002 mbar
RPM80102	812700	15,025 mbar	0,002 mbar
RFY80206	811829	119,76 sccm	1,96 sccm

eine hohe Präzision der Druckstabilisierung und ein vernachlässigbarer Einfluss der Umgebung auch über längere Perioden geschlossen werden.

Tabelle 4.7 zeigt die statistischen Kenngrößen für Druck im WGTS Pufferbehälter und Fluss in diesen. Vergleicht man Tabelle 4.7 mit Tabelle 4.6 aus Run 4, so erkennt man, dass die kurze Periode (ca. 7 Stunden von 450 Stunden insgesamt) des Heizens bereits einen Faktor vier in der Standardabweichung ausmacht. Da es sich hier jedoch um einen Temperatursprung von 20 K handelt, bleibt zu untersuchen, wie sich diese Werte bei Temperaturänderungen von  $\Delta T < 1$  K verhalten.



**Abbildung 4.23: Fouriertransformation der Messwerte von RPM80102 bei Run 5.**

Dargestellt ist die Fouriertransformation der Messwerte von RPM80102 über die gesamte Dauer von Run 5. Neben einem für elektronisches Rauschen typischen, leichten Abfall ab ca. 150 Hz finden sich keine ausgeprägten Frequenzen im Spektrum. Sämtliche Werte liegen unter einer Amplitude von  $10^{-4}$  und sind daher als nicht signifikant zu beurteilen.

Trotz der Variation der Temperatur der WGTS Attrappe in einem weiten Temperaturbereich während Run 5 ist es möglich die minimalen Erfordernisse von KATRIN um einen Faktor 7,5 besser zu erfüllen (analog zu Run 4). D.h. Druckschwankungen sind nur etwa halb so groß wie maximal zulässig. Das Fehlen ausgeprägter Frequenzen im Fourierspektrum aus Abbildung 4.23 zeigt außerdem die ausgesprochene Stabilität des Systems auf kurzen wie auch auf langen Zeitskalen.

## 4.6 Äußere Einflüsse auf die Druckstabilisierung

Als erstes soll an dieser Stelle in Kapitel 4.6.1 das Verhalten beim Einstellen eines neuen Sollwertes demonstriert werden. Es wird gezeigt, welche Zeit das System benötigt, um wieder einen stabilen Einspeisedruck bereit zu stellen.

Danach folgt in Kapitel 4.6.2 eine Demonstration der Funktionsfähigkeit der Druckstabilisierung in einem weiten Druckbereich von 2 mbar bis 20 mbar. Diese Fähigkeit ist eine Forderung von KATRIN, um die systematischen Untersuchungen zum Energieverlust von Elektronen durch Stöße an Tritiumgas durchführen zu können (siehe Kapitel 4.6.1).

In Kapitel 4.5.3 (Run 5) wurde bereits erwähnt, dass die WGTS Attrappe die Möglichkeit des Beheizens und somit der Aufbringung einer Störgröße bietet. Dies soll in Kapitel 4.6.2 näher betrachtet werden.

### 4.6.1 Verhalten bei Sollwertänderung (Einschwingverhalten)

In Abbildung 4.24 ist das Einschwingverhalten des Drucks im WGTS Pufferbehälter TBN80100 dargestellt. Neben dem Signal des Drucksensors finden sich dort ebenfalls der Gasfluss von TBN80200 nach TBN80100 sowie der Grad der Öffnung des Regelventils vor TBN80100.

Es lassen sich in Abbildung 4.24 folgende Zeiten zum stabilen Erreichen eines neuen Sollwertes ablesen:

1. Druckänderung von 12,8 mbar auf 10 mbar

$$\Delta t = 0,136 \text{ h} \approx 8 \text{ min} \quad (4.4)$$

2. Druckänderung 10 mbar auf 10,1 mbar

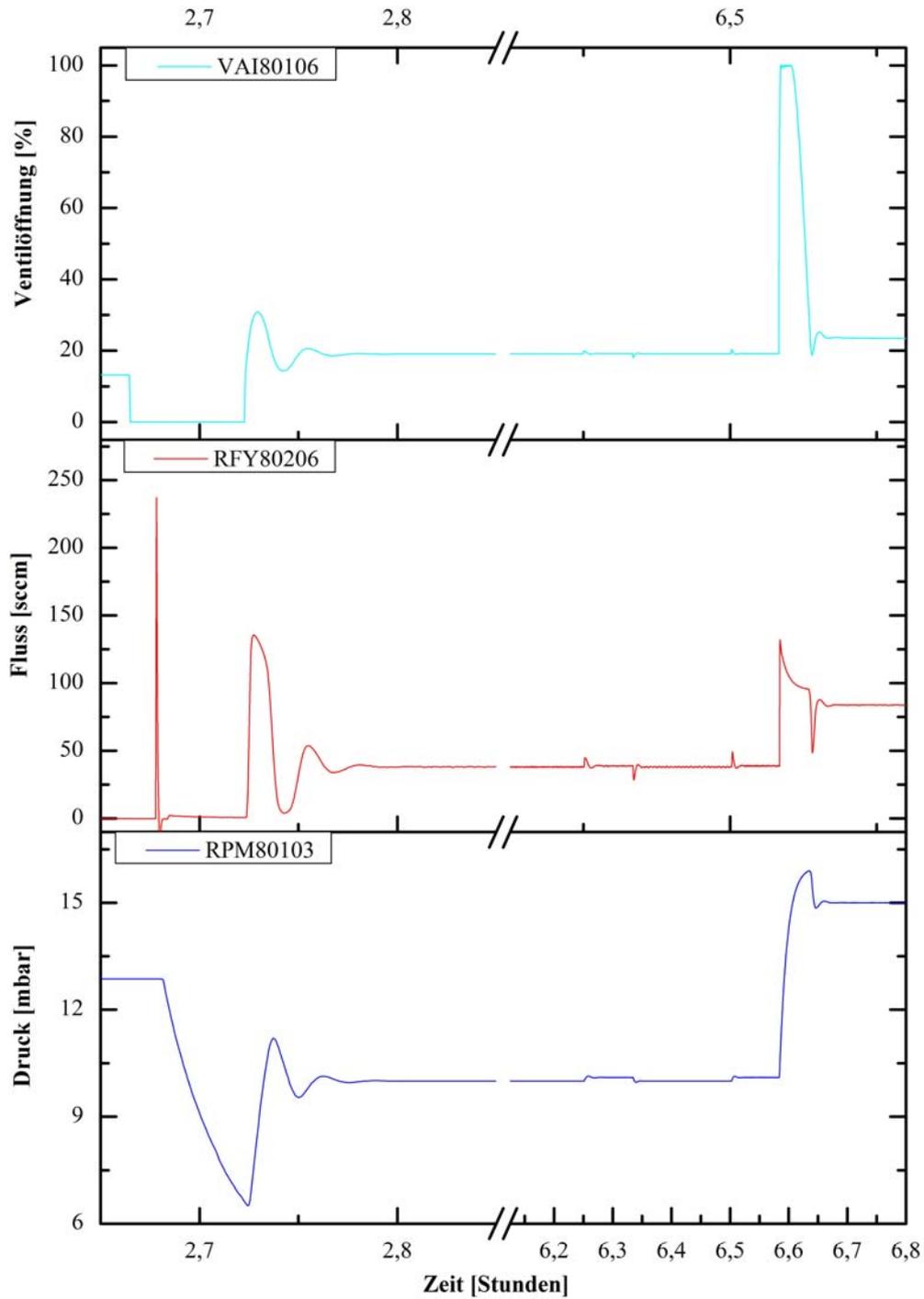
$$\Delta t = 0,039 \text{ h} \approx 2 \text{ min} \quad (4.5)$$

3. Druckänderung 10,1 mbar auf 12 mbar

$$\Delta t = 0,123 \text{ h} \approx 7,5 \text{ min} \quad (4.6)$$

Daneben kann man aus Abbildung 4.24 erkennen, dass das Entleeren bzw. Füllen in minimaler Zeit abläuft. Etwa die Hälfte der berechneten Zeit bei (4.4) zum Erreichen des neuen Sollwertes benötigt das System zum Entleeren des Überdrucks bezüglich des neuen Sollwertes. Dass dieser Prozess nicht schneller

geschehen kann zeigt die Öffnung von VAI80106 an. Das Regelventil ist für ca. 4 Minuten komplett geschlossen, TBN80100 agiert in dieser Zeit als Druckspeicher.



**Abbildung 4.24: Einschwingverhalten bei Sollwertänderung in TBN80100.**

Dargestellt ist das Einschwingverhalten des Drucks im WGTS Pufferbehälter aufgezeichnet mit dem Drucksensor RPM80103 (blau). Daran gekoppelte Größen sind der Fluss in diesen Behälter (rot) sowie der Grad der Öffnung des Regelventils vor TBN80100 (cyan). Die Daten stammen aus Run 2.

Ähnliches gilt bei (4.6). Beim Sollwertsprung von 10,1 mbar auf 15 mbar hat VAI80106 zu 100% geöffnet und gestattet damit maximalen Fluss.

Betrachtet man den Bereich, in welchem die Öffnung des Regelventils VAI80106 entweder  $<1\%$  oder  $>99\%$  ist, so lässt sich für den Entleerungs- sowie Füllvorgang je eine Zeitkonstante berechnen:

- ♦ Leeren:  $\tau_L \approx 0,03$  mbar/Sekunde
- ♦ Füllen:  $\tau_F \approx 0,05$  mbar/Sekunde

Die Zeit, welche das System zum kompletten Einschwingen benötigt, ist für die Belange bei KATRIN hinreichend kurz. Eine Sollwertänderung des Drucks wird im Messbetrieb höchstens einmal pro Tag ausgeführt, so dass eine Einschwingdauer von ca. 15 Minuten unerheblich ist. Stärkere Über- bzw. Unterschwinger während der Einschwingphase sind nicht kritisch.

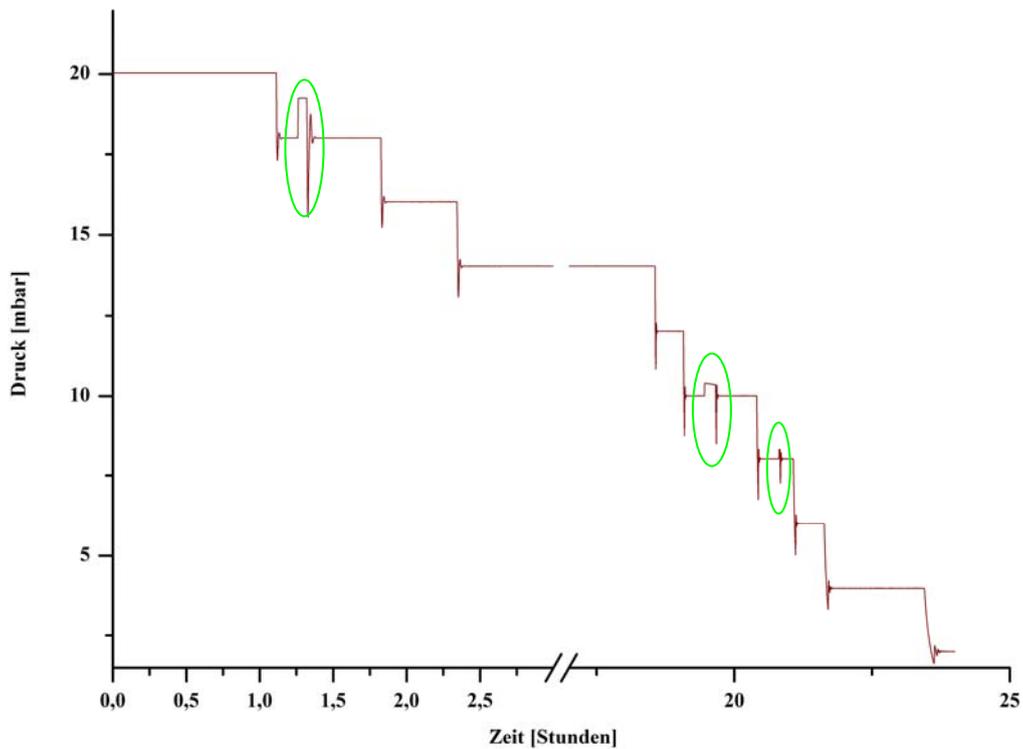
#### **4.6.2 Demonstration der Druckstabilisierung bei verschiedenen Sollwert-Vorgaben**

Es ist wichtig, die Energieverlustfunktion der Elektronen bei KATRIN genau zu kennen. Dazu wird es notwendig sein, die Säulendichte in der WGTS von 10 % bis 120 % bezüglich des Wertes im Normalbetrieb (ca. 15 mbar Einspeisedruck, was einer Säulendichte von  $\rho d = 5 \cdot 10^{17}$   $1/\text{cm}^2$  entspricht) zu variieren [KAT04]. Da eine Variation der Säulendichte durch eine Variation des Druckes im WGTS Pufferbehälter hervorgerufen werden kann, muss das System „Inner-Loop“ in der Lage sein, einen Einspeisedruck korrespondierend zu einem Bereich der Säulendichte von 10...120 % auf einem Niveau  $\Delta p/p < 10^{-3}$  stabil zu liefern.

Um die Regelung in verschiedenen Druckbereichen zu testen, wurden zehn unterschiedliche Druckstufen im Bereich von 2 mbar bis 20 mbar angefahren. Das Resultat bei einem Sollwert von 1 mbar kann in Run 2 (Kapitel 4.4) nachgelesen werden. Die Messung fand im Anschluss an Run 2 mit Stickstoff statt. Da in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt wurde, dass die Regelung mit Stickstoff innerhalb der gleichen Grenzen der Genauigkeit operiert wie mit Deuterium, können die Ergebnisse dieses Tests ebenfalls als für Deuterium gültig betrachtet werden.

Zur Überprüfung der Druckstabilisierung wurden zu jeder Einstellung der Mittelwert sowie die zugehörige Standardabweichung berechnet. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 4.8. Ergänzend zu diesen Werten gelten natürlich sämtliche Ergebnisse der Kapitel 4.3 bis 4.5.3.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Druckstabilisierung bei sämtlichen Sollwertvorgaben innerhalb der geforderten Grenzen realisiert werden kann. Drücke über 20 mbar sind in der gegenwärtigen Konfiguration der Sicherheitsabschaltung nicht möglich, da ab 24 mbar in TBN80100 das Auslösen der Verriegelung (Sicherer Zustand B) erfolgen würde. Um dies zu vermeiden sind Modifikationen an der Hardware notwendig.



**Abbildung 4.25: Druckstabilisierung Run 2 bei unterschiedlichen Sollwerten.**

Dargestellt ist der Druck in TBN80100 (Sensor: RPM80102) während des Anfahrens unterschiedlicher Sollwerte. Schwankungen (grüne Markierung) bei 18, 10 und 8 mbar rühren von Einstellungen des Benutzers am System (z.B. Öffnen eines Ventils etc.) her und gehen nicht in die Berechnung der statistischen Werte ein.

**Tabelle 4.9: Statistische Parameter bei unterschiedlichen Sollwertvorgaben Run 2.**

Sollwertvorgabe [mbar]	Anzahl Messpunkte	Mittelwert [mbar]	Standardabweichung [mbar]
20	1962	20,0381	0,0008
18	768	18,0333	0,0010
16	801	16,0300	0,0018
14	29099	14,0269	0,0016
12	839	12,0223	0,0012
10	1834	10,0136	0,0015
8	897	8,0095	0,0017
6	839	6,0061	0,0020
4	3025	4,0030	0,0013
2	308	1,9990	0,0011

### **4.6.3 Demonstration der Druckstabilisierung bei veränderlichen Temperaturen der WGTS-Attrappe**

Bereits in Abbildung 4.1 wurde eine WGTS Attrappe erwähnt. Dabei handelt es sich um ein U-förmiges Rohr mit 4 mm Innendurchmesser und 1300 mm Länge. Dieses besitzt einen vergleichbaren Leitwert (ca. 0,03 l/mbar·s) wie später die WGTS samt Zu- und Ableitungen besitzen wird. Dies ermöglicht ein Testen des Inner Loops, ohne dass die WGTS tatsächlich vorhanden bzw. angeschlossen ist.

Die WGTS Attrappe besitzt die Möglichkeit des Beheizens mittels eines angeschweißten Heizdrahtes. Die Temperatur wird mit Hilfe von drei PT100 Temperatursensoren aufgenommen, wobei je ein Sensor am Anfang, in der Mitte und am Ende angebracht ist (RTP80151, RTP80152, RTP80153). Geregelt wird auf einen Sensor, RTP80153. Daher werden sämtliche Temperaturen der WGTS Attrappe im Folgenden durch RTP80153 repräsentiert.

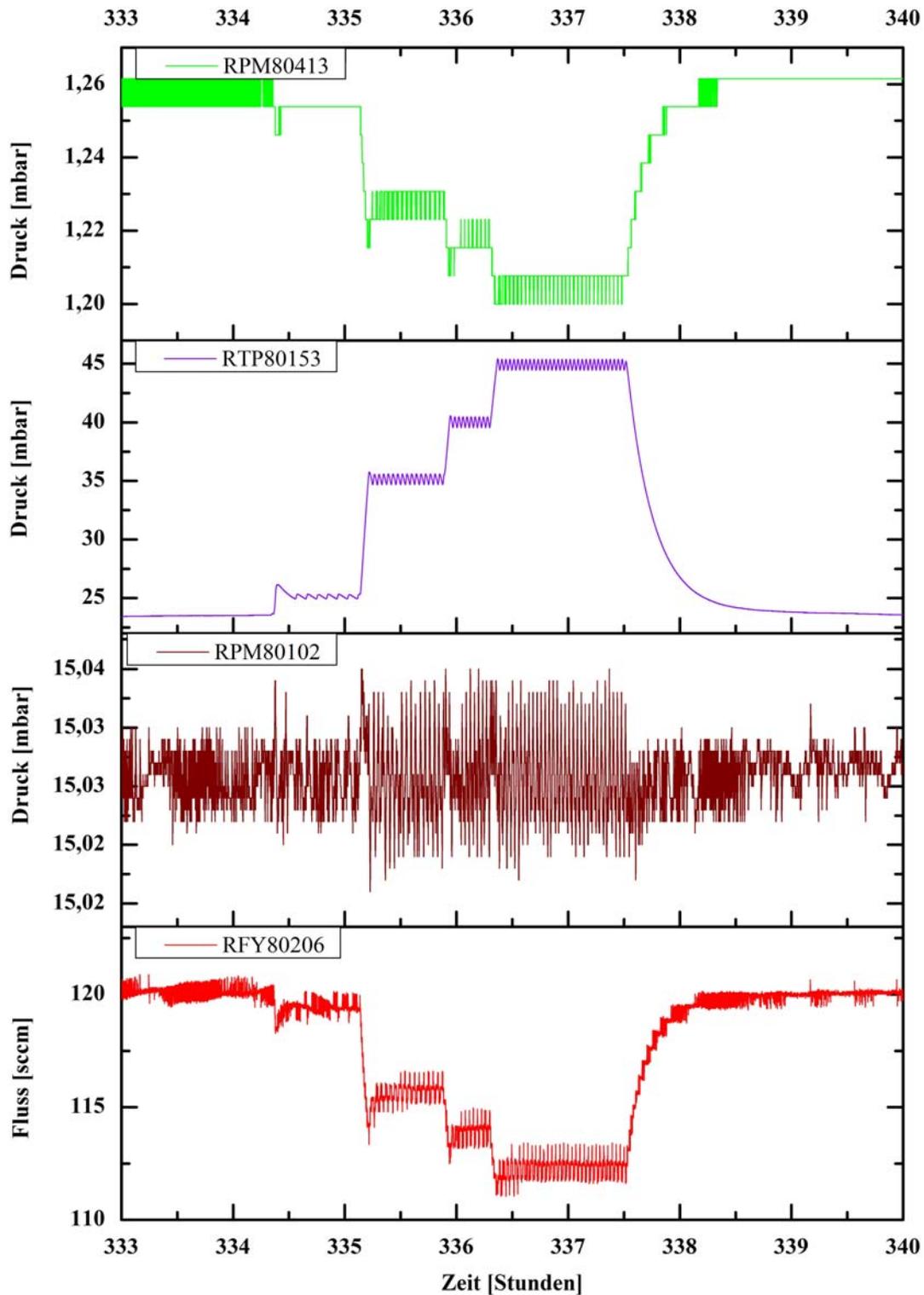
Die erhaltenen Resultate bei Temperaturvariation sind in Abbildung 4.26 dargestellt.

Es ist eine sehr klare Korrelation zwischen der Temperaturerhöhung und der Änderung im Fluss zu erkennen. Zu jeder der vier angefahrenen Temperaturen bildet sich ein entsprechender und klar zu unterscheidender Fluss heraus. Ebenfalls deutlich zu sehen (wenn auch bereits nahe an der Digitalisierungsgrenze) ist der stufenweise Druckabfall nach der WGTS Attrappe an RPM80413.

In Abbildung 4.26 kann man am Signal von RPM80102 eine leichte Veränderung des Spitze-Spitze-Werts feststellen. Für die Dauer des Beheizens auf 35-45 °C liegt das „Rauschniveau“ von RPM80102 etwas höher.

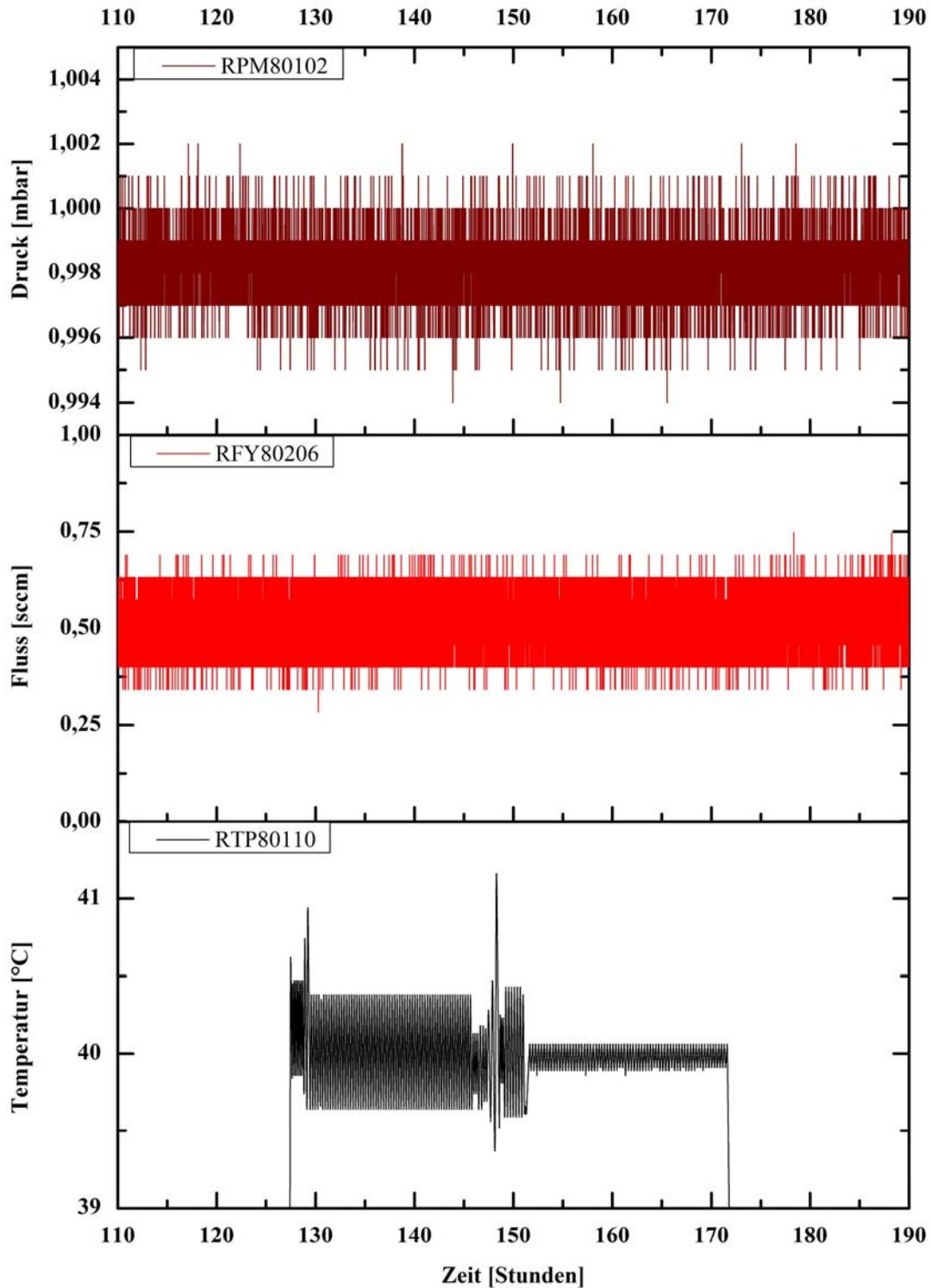
Da es sich hierbei um eine Temperaturerhöhung um  $\Delta T \approx 20$  K handelt, kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Temperaturveränderung von z.B.  $\pm 1$  K, wie es bei KATRIN evtl. relevant sein dürfte, keine messbare Änderung in RPM80102 festgestellt werden kann. Kleine Temperaturvariationen der Verbindungsleitung und Kapillaren sind daher nach derzeitigem Kenntnisstand unerheblich in Bezug auf die sich einstellende Säulendichte in der WGTS.

Während des Findens der optimierten Regelparameter für TBN80100 wurde Stickstoff zirkuliert. Prinzipiell bietet Run 2 also ebenfalls die Möglichkeit um Veränderungen im Fluss und Druck festzustellen. Jedoch zirkulierte Stickstoff lediglich mit einem Sollwert von 1 mbar. Bei einem solch niedrigen Druck ist innerhalb der Mess- und Auflösungsgrenzen der installierten Sensoren und ADC's keine Veränderung - weder im Fluss noch im Druck vor / nach der WGTS Attrappe - zu erkennen (Abbildung 4.27).



**Abbildung 4.26: Temperaturvariation Run 5 an der WGTS Attrappe.**

Dargestellt ist die Temperaturvariation der WGTS Attrappe (violett), der Druck an RPM80102 (braun) und der Gasfluss in den WGTS Pufferbehälter TBN80100 (rot) (siehe Abbildung 4.1). Die Daten stammen aus Run 5.



**Abbildung 4.27: Temperaturvariation Run 2 des WGTS Pufferbehälters.**

Dargestellt ist unten die Temperaturerhöhung von Raumtemperatur auf einen Sollwert von 40 °C. Es ist während dieser Zeit keine Änderung im angezeigten Signal für Druck (braun, Sollwert 1 mbar) und Fluss (rot) zu erkennen. Die Daten stammen aus Run 2.

## 4.7 Diskussion der Ergebnisse in Bezug auf KATRIN

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Stabilität des Systems gezeigt. Sämtliche Abweichungen liegen innerhalb der von KATRIN geforderten Grenzen von 0,1%, abgesehen von RPM80103 bei 1 mbar Sollwert in Run 2, was jedoch ein Artefakt der schlechteren Auflösung ist. Der höher aufgelöste Sensor RPM80102 liefert jedoch auch dort ein sich noch in den Grenzen der Anforderung befindliches Ergebnis.

Folgende Ziele wurden erreicht:

- ◆ Der Sollwert des Drucks in TBN80100 steht stabil innerhalb der geforderten Grenzen von KATRIN ( $\Delta p/p < 10^{-3}$ ). Die Resultate zeigen, dass im KATRIN relevanten Bereich von 10 – 15 mbar ein  $\Delta p/p \approx 10^{-4}$  erzielt werden kann. Tabelle 4.9 fasst die erhaltenen Resultate zusammen.

Nach [Sha03] und [Sha04] ruft eine Druckänderung im Einspeisedruck in die WGTS von  $p_{in} = 3,032 \cdot 10^{-3}$  mbar nach  $p_{in} = 3,350 \cdot 10^{-3}$  mbar (10% Änderung) eine Veränderung der Säulendichte in der WGTS von  $4,5 \cdot 10^{17}$  1/cm<sup>2</sup> nach  $5 \cdot 10^{17}$  1/cm<sup>2</sup> hervor. Demnach skalieren Druckänderungen im WGTS Puffer Behälter 1:1 bis in die Säulendichte in der WGTS durch. Betrachtet man nun eine mittlere erreichte Standardabweichung von ca. 0,02 % auf den Mittelwert, so entspricht dies einer Abweichung in der Säulendichte von ca.  $\pm 0,001 \cdot 10^{17}$  1/cm<sup>2</sup>.

- ◆ Die Variabilität des Systems bezüglich des Sollwerts wurde demonstriert. Es ist möglich einen Sollwert im Bereich von 1 - 20 mbar einzustellen und über einen beliebigen Zeitraum innerhalb der KATRIN Anforderungen stabil zur Verfügung zu stellen.
- ◆ Die Regelparameter der Regler des Inner Loop wurden optimiert, um zum einen störende Einflüsse durch Temperaturschwankungen zu minimieren und zum anderen die erforderlichen Grenzen der Druckstabilisierung einzuhalten. Weitergehend wurden Regelparameter so optimiert, dass ein möglichst schnelles Anfahren eines neuen Sollwerts möglich ist (siehe Kapitel 4.6.1).
- ◆ In Kapitel 4.6.3 wurde der Einfluss einer Störgröße, nämlich einer Temperaturvariation der WGTS-Attrappe untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass selbst Temperaturvariationen mit einem  $\Delta T \approx 20$  K einen nur verschwindenden Einfluss auf die Druckstabilisierung besitzen. Da sich Temperaturfluktuationen bei KATRIN später wahrscheinlich in einem Bereich  $\Delta T < 1$  K abspielen, ist der Einfluss als vernachlässigbar zu betrachten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sämtliche Abweichungen in der Druckstabilisierung einen Faktor 5 oder mehr geringer sind, als es die minimalen Anforderungen von KATRIN fordern. Einflüsse von Temperaturschwankungen können nahezu als vernachlässigbar betrachtet werden. Außerdem ist ein Betrieb in einem weiten Druckbereich stabil möglich, was für Messungen der Transmissionsfunktion notwendig ist.

Damit wurden die grundlegenden Anforderungen an den Aufbau des Inner Loop voll und ganz erfüllt.

**Tabelle 4.10: Zusammenfassung der Ergebnisse aus Runs 1-5.**

Dargestellt sind die Mittelwerte der Temperaturen in den Runs 1-5 zusammen mit der berechneten Standardabweichung und der sich daraus ergebenden Abweichung in Promille.

Run Nummer	Sensor	Druck [mbar]	Standardabweichung [mbar]	Abweichung in Promille
1	RPM80103	9,99999	0,00235	0,235
	RPM80103	15,0000	0,0022	0,147
2	RPM80103	10,000	0,002	0,200
	RPM80102	10,015	0,0012	0,120
	RPM80103	0,999	0,002	2,002
	RPM80102	0,9981	0,0009	0,978
	RPM80103	19,999	0,002	0,100
	RPM80102	20,0378	0,0009	0,045
3	RPM80103	10,001	0,002	0,200
	RPM80102	10,0145	0,0019	0,190
4	RPM80103	15,000	0,002	0,133
	RPM80102	15,024	0,002	0,133
5	RPM80103	15,000	0,002	0,133
	RPM80102	15,025	0,002	0,133

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Das KATRIN Experiment dient zur Bestimmung der Neutrinomasse, angestrebt ist eine Sensitivität von  $\approx 0,2 \text{ eV}/c^2$ . Dazu wird in einer fensterlosen, gasförmigen Quelle (WGTS) Tritiumgas verwendet. Durch die Transportstrecke erfolgen der adiabatische Transport der Zerfallselektronen sowie die Reduktion des Tritiumflusses um 14 Größenordnungen. Zur Untersuchung des Energiespektrums der Zerfallselektronen wird ein Tandemspektrometeraufbau genutzt. Beide Spektrometer arbeiten nach dem MAC-E-Filterprinzip. Das Vorspektrometer dient dabei der Untergrundreduktion, indem in diesem der niederenergetische Teil des Elektronenspektrums abgeschnitten wird. Das Hauptspektrometer vermisst anschließend präzise das Energiespektrum der das Vorspektrometer passierten Elektronen nahe des Endpunktsbereich von  $\approx 18,6 \text{ keV}$ . Der Nachweis der Zerfallselektronen erfolgt mit Hilfe eines Halbleiterdetektors, welcher an der, der Transportstrecke gegenüberliegenden Seite des Hauptspektrometers montiert ist.

Das KATRIN-Experiment benötigt zur Messung der Neutrinomasse im sub-eV Bereich eine 0,1 % stabilisierte Einspeisung von Tritiumgas in die WGTS. Dies ist experimentell realisiert mit einem speziell dafür entwickelten Tritiumkreislauf, der als Kernstück ein druckstabilisiertes Tritiumgas-Einspeisesystem beinhaltet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Kreislauf für die stabile Gaseinspeisung aufgebaut und in Betrieb genommen. Ein weiterer Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit war die systematische Untersuchung des Systems „Inner Loop“.

Es wurde unter anderem gezeigt, dass die Druckstabilisierung des Tritiumkreislaufs über mehrere Wochen hinweg ausgezeichnet funktionierte. Die Stabilisierung des Drucks war besser als 0,1 % (wie von KATRIN gefordert). Es konnte in den meisten Fällen eine Stabilisierung des Druckes in TBN80100 auf einem Niveau besser als 0,02 % demonstriert werden. Dies bedeutet, dass der im Rahmen dieser Diplomarbeit im TLK aufgebaute Inner-Loop die von KATRIN gestellten Anforderungen um mehr als einen Faktor 5 übertrifft, unabhängig vom eingestellten Sollwert (im Intervall 1 mbar bis 20 mbar). Damit konnte auch gezeigt werden, dass die Voraussetzungen für systematische Energieverlustmessungen mit dem im Tritiumlabor Karlsruhe aufgebauten Tritiumkreislauf gegeben sind.

Dennoch besteht auch beim Inner-Loop noch Raum zu Verbesserungen, die im Folgenden diskutiert werden sollen. Des Weiteren werden Messungen vorgeschlagen, um die Auswirkungen unterschiedlicher Einflussgrößen genauer bestimmen zu können.

Zu den möglichen Verbesserungen zählen:

- ♦ Sensor RPM80413 (Abbildung 4.1) gegen ein Modell mit höherer Auflösung tauschen. Es handelt sich dabei um den ersten Sensor nach der WGTS Attrappe. Möchte man weitere Messungen mit z.B. der Heizung der WGTS Attrappe machen und auch kleine Einflüsse von Temperaturschwankungen auffinden, dann sollte dort ein Drucksensor mit höherer Auflösung zum Einsatz kommen (das momentan verbaute Modell besitzt eine Genauigkeit von  $\pm 1\%$  vom angezeigten Wert). Es bleibt weiterhin zu bedenken, dass ein Sensor optimaler Weise unmittelbar an den Austrittsflansch der WGTS Attrappe montiert werden sollte, um eine zusätzliche Reduktion des Messsignals durch Druckabfall in sich anschließenden Rohrleitungen zu vermeiden. Dies würde unter Umständen dann auch die Anforderungen an die Auflösung des Sensors reduzieren, da die zu messenden Schwankungen in diesem Fall noch eine größere Amplitude besitzen als dies in der gegenwärtigen Konfiguration der Fall ist.
- ♦ Die standardmäßig verwendeten Analog-Digital-Konverter „verschenken“ großteils ein oder teilweise sogar zwei Bit ihrer Auflösung aufgrund der Tatsache, dass ADC's mit einem Eingangsspannungsbereich von  $-10\dots+10$  V lediglich mit Messsignalen von  $0\dots+10$  V oder sogar nur  $0\dots+5$  V belegt werden. Daneben finden häufig nur ADC's mit 12 bit Auflösung Verwendung. An kritischen bzw. physikalisch interessanten Stellen sollten daher ADC's mit 16 Bit Auflösung (Kosten ca. 500€ für 8 ADC Kanäle entsprechend einer Baugruppe) und einem auf das zu digitalisierende Signal abgestimmten Eingangsspannungsbereich verwendet werden. ADC's mit mehr als 16 bit Auflösung sind derzeit für das verwendete Prozessleitsystem Siemens S7 nicht verfügbar.
- ♦ Die Regelung des Drucks in TBN80100 erfolgt zurzeit über den Drucksensor RPM80103. Wie jedoch in Kapitel 4 bereits erwähnt und in Anhang C berechnet wurde, besitzt dieser Sensor aufgrund des verwendeten ADC's eine vierfach schlechtere Auflösung als der ebenfalls an TBN80100 montierte, baugleiche Drucksensor RPM80102. Falls es nicht generell zu einem Tausch der verwendeten ADC's kommen sollte, so bietet sich die Überlegung an, die Regelung des Drucks über RPM80102 zu machen und RPM80103 in seiner gegenwärtigen Konfiguration nur als Reserve- und Kontrollsensor zu betreiben. Diese Maßnahme ist mit einem minimalen Aufwand an Zeit zu realisieren.

Neben den möglichen Verbesserungen im Hardwarebereich werden im Folgenden weitere Messungen diskutiert, die in naher Zukunft durchgeführt werden sollten um ein tieferes Verständnis über den vorhandenen Aufbau zu erhalten. Dazu zählt:

- ◆ Der Druck in TBN80100 sollte 1...20 mbar in ca. 2 mbar Schritten variiert werden, so wie dies bereits für die in Kapitel 4.6.2 gezeigten Daten gemacht wurde. Zusätzlich kann dann zu jeder Druckstufe die Temperatur des WGTS Dummy Rohres von Raumtemperatur bis ca. 45 °C erhöht werden. Hier wären Schritte von ca. 5 K sinnvoll. Eine Auswertung würde in Analogie zur Betrachtung der Messwerte in Kapitel 4.6.3 erfolgen.

Ziel dieser Messungen wäre es festzustellen, ab wann (welcher Druck in TBN80100 kombiniert mit einer Temperatur des WGTS Dummy Rohres) sich eine Temperaturveränderung (der WGTS Attrappe) bemerkbar machen würde. Dabei gibt wahrscheinlich der Gasfluss, gemessen von RFY80206, früher einen Hinweis auf einen Einfluss als der mit RPM80102 gemessene Druck.

- ◆ Beim Betrieb von KATRIN befindet sich die Handschuhbox der ISS, in welcher sich der Aufbau des Inner Loops befindet, im Streufeld der supraleitenden Magnete der WGTS. Abschätzungen zufolge ist eine magnetische Feldstärke von 5...20 Gauss zu erwarten (Anhang F). Bereits erfolgte Tests von Drucksensoren in Magnetfeldern [Ker09] zeigen, dass dies einen Einfluss auf die Messwerte hat. Es gilt daher zu bestimmen, wie groß der Einfluss von magnetischen Feldern auf die Präzision der Druckregelung ist. Dies kann dadurch realisiert werden, indem Permanentmagnete entsprechender Stärke direkt neben/auf dem Sensorgehäuse platziert werden.
- ◆ Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde noch nicht getestet, welchen Einfluss das Abführen von verunreinigtem Gas und das gleichzeitige Zuführen von neuem Gas auf die Regeleigenschaften bezüglich des Drucks in TBN80100 besitzen. Die muss vor dem KATRIN Betrieb getestet sowie die abzuführende Menge an Gas minimiert werden.
- ◆ Im Rahmen des Aufbaus des Inner Loops wurden zwei Zylinder mit Stickstoff in den Kreislauf eingebaut. Aus diesen kann über zwei Ventile je eine kleine, definierte Gasmenge in den Kreislauf eingebracht werden. Dies dient zur Simulation von Verunreinigungen. Es lassen sich damit die Regeleigenschaften zur Abführung von verunreinigtem Gas vor dem Circulation Loop Permeator (FLM80300) bestimmen und testen. Da es einen zeitlichen Konflikt zur Inbetriebnahme der ISS gab, konnten diese Messungen bisher noch nicht ausgeführt werden.

Neben diesen vorgeschlagenen Messungen ist es auch noch interessant und für den Betrieb notwendig zu wissen, wie viel Tritiumgas sich im gesamten System des Inner Loops befindet („Inventarbestimmung“). Dazu wurde im Rahmen dieser Arbeit eine erste grobe Abschätzung angefertigt (Anhang A). Da im Leitungsgewerk des Inner Loop jedoch praktisch an jeder Stelle ein anderer Druck

herrscht, müsste eine den Messstellen entsprechende, sinnvolle Aufteilung verschiedener Regionen im Leitungsvolumen erfolgen. Darauf aufbauend könnte dann für den jeweiligen Bereich das Volumen bestimmt und mit dem korrespondierenden Druck eine genauere Abschätzung des darin enthaltenen Inventars angefertigt werden.

Trotz der in diesem Kapitel vorgeschlagenen Verbesserungen und Messungen kann bereits jetzt gesagt werden, dass es sich beim Inner-Loop System um einen recht robusten Aufbau mit ausgezeichneten Regeleigenschaften bezüglich der Druckstabilisierung handelt, wodurch einem erfolgreichen Messbeginn von KATRIN seitens der druckstabilisierten Einspeisung von Tritiumgas in die WGTS nichts im Wege stehen sollte.

# Anhang

## Anhang A-Berechnung der Aktivität in den Loopsystemen

Aus den angegebenen Volumina ergibt sich die gesamte im Circulation Loop vorhandene Aktivität zu den in Tabelle A.2 berechneten Werten. Einzelvolumina wurde mit Hilfe von 3D-CAD Zeichnungen sowie Datenblättern von Sensoren und Verbindungsstücken (Adapter etc.) bestimmt. Ein neu befülltes System (ca. 800 mbar im Feed Loop, Exhaust Loop entleert; ohne Loopino) bei einem Druck von 150 mbar in TBN 80200 würde demnach ca.  $25 \cdot 10^{14}$  Bq Aktivität (entspricht ca. 7 g Tritium) enthalten (fett markiert in Tabelle A.2).

**Tabelle A.1: Berechnung der Volumina in den Teilsystemen.**  
Alle Angaben in cm<sup>3</sup>. Mit (\*) markierte Felder wurden noch nicht berechnet.

	Circulation Loop	Exhaust Loop	Loopino	Vakuumsystem	Feed Loop
Rohrleitungsvolumen	354	*	237	*	*
Ventile	555	*	*	*	*
Sensoren	87,6	*	*	*	*
Wellschläuche (incl 10% Fehler)	199	*	*	*	*
Behälter und Permeator	17602	100000	1000	24921	29193
Pumpen	750	*	*	*	*
Adapter/Kreuzungen/T-Stücke	61,7	*	*	*	*
<b>≈Total Volumen [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>19610</b>	<b>100000</b>	<b>1237</b>	<b>24921</b>	<b>29191</b>
5% Fehler [cm <sup>3</sup> ]	980	5000	62	1246	1460
min. Volumen [cm <sup>3</sup> ]	18629	95000	1175	23675	27733
max. Volumen [cm <sup>3</sup> ]	20590	105000	1299	26167	30652

**Tabelle A.2: Berechnung der Aktivität in den Teilsystemen.**  
Grundlage der Berechnungen sind Standardbedingungen (0 °C, 1013 mbar; \*: nicht berechnet).

Druck [mbar]	Aktivität [ $10^{14}$ Bq] (Tritiuminventar [g]) im/in				
	im Teilsystem	Circulation Loop	Exhaust Loop	Loopino	Vakuumsystem Feed Loop
5	-	0,47 (0,13)	-	*	-
10	-	0,95 (0,26)	-	*	-
20	-	1,89 (0,53)	-	*	-
100	1,85 (0,52)	-	0,117 (0,03)	*	-
150	<b>2,78 (0,78)</b>	-	0,175 (0,05)	*	-
200	3,71 (1,04)	-	0,234 (0,07)	*	-
300	-	-	-	*	8,27 (2,32)
500	-	-	-	*	13,8 (3,86)
700	-	-	-	*	19,3 (5,40)
800	-	-	-	*	<b>22,1 (6,18)</b>
900	-	-	-	*	24,8 (6,95)

## Anhang B - Berechnung der Ansprechzeit eines Drucksensors auf ein entstehendes Leck

In Tabelle B.1 sind für drei Stellen des Circulation Loops exemplarisch die Ansprechzeiten der jeweiligen Sensoren auf ein Leck mit einer Leckrate von  $1 \cdot 10^{-6}$  mbar·l/s berechnet. Nicht berücksichtigt sind Nullpunktsdrift und Temperaturdrift. Beides sind laut technischen Unterlagen Effekte im Bereich von ca.  $10^{-3}$  % vom Vollausschlag.

Es ist zu berücksichtigen, dass diese Rechnung nur in einem statischen Fall Gültigkeit besitzt, wenn also sämtliche Ventile des Circulation Loops geschlossen sind. Wird unter KATRIN Bedingungen Gas zirkuliert, so erfolgt am Permeator (FLM80300) ein ständiges Abführen von verunreinigtem Gas (<1%) und an TBN80200 ein Nachfüllen der abgeführten Gasmenge (max. 2 sccm). Da das Nachfüllen vom Druck in TBN80200 geregelt wird, würde auch ein durch ein Leck entstehender Druckabfall durch dieses Nachfüllen ausgeglichen werden. Diese Tatsache lässt es unmöglich erscheinen, ein Leck per Druckabfall an einem der Sensoren zu erkennen. Ein Erkennen von aufgesammelten Verunreinigungen auf der Feedseite des Permeators ist schwierig, da kontinuierlich Gas abgeführt wird. Die Sensitivität für ein Leck im Bereich  $10^{-6}$  mbar·l/s liegt bei 5 h/digit.

Falls diese Methode zum Einsatz kommen sollte, dann erscheint sie nur für den Feed Loop (ohne TBN82300) sinnvoll, da dieser sich normalerweise als abgeschlossenes Volumen darstellt.

Umgekehrt würde ein Austritt von Tritiumgas aus den Loops sehr schnell (wenige Sekunden) von den an den Handschuhboxen angebrachten Ionisationskammern entdeckt werden. Dies würde auch ein Leck in der WGTS Verbindungsleitung mit abdecken, da deren zweite Hülle an die Handschuhbox angeschlossen wird.

**Tabelle B.1: Berechnung der Zeit bis zur Anzeige eines Lecks.**

Die angegebenen Zeiten beziehen sich auf einen Ausschlag um ein digit. Es wird daher mindestens die vier- bis fünffache Zeit zum Erkennen eines Trends notwendig sein.

Leckrate in mbar·l/s	Auflösung des Sensors in mbar	Behältervolumen in l	Behälter	Sensor	Ansprechzeit	
					in s für ein digit	in Stunden für ein digit
$10^{-6}$	$1,3332 \cdot 10^4$	15,1	TBN80100	RPM80103	2000	0,6
$10^{-6}$	1	0,018	FLM80300 Bypass	RPM80310	$1,80 \cdot 10^4$	5
$10^{-6}$	0,525	0,41	FLM80300	RPM80425	$2,2 \cdot 10^5$	60

1% Genauigkeit bei Anzeige von 100mbar  
 0,15% Genauigkeit bei Anzeige von 350mbar  
 Leitung 006-8-0427 und 006-8-0217a

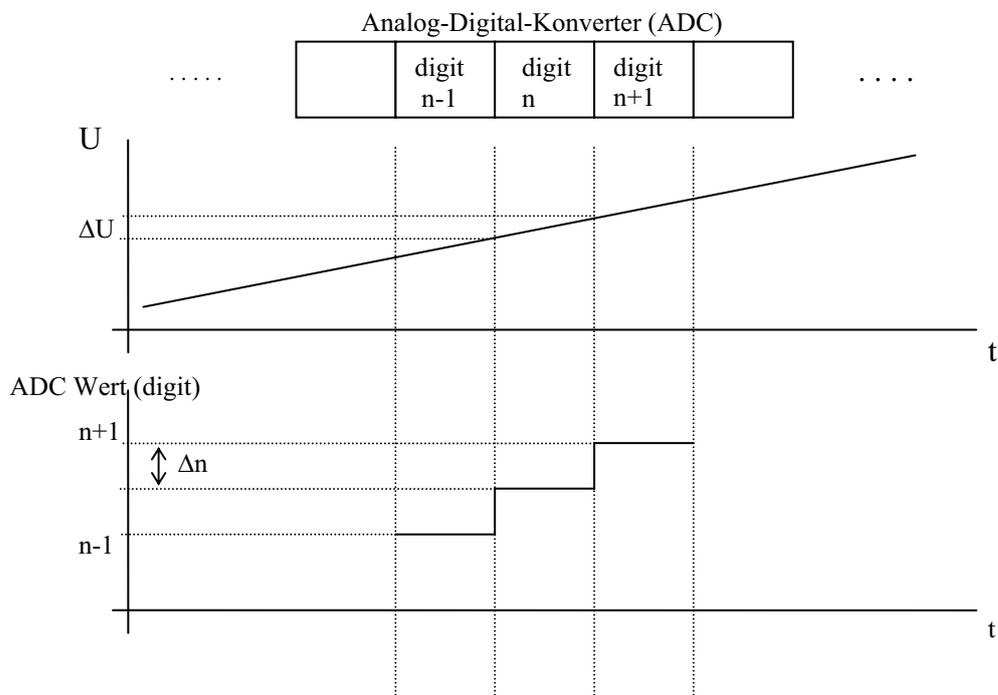
### Anhang C - Berechnung der Auflösung des ADC von RPM80102 und RPM80103

Zur Bestimmung und Festlegung der Klassenbreite (Klasseneinteilung, „Binning“) in den Histogrammen in den Kapitel 4.3 bis 4.5.3 wurde die Auflösung der verwendeten Analog-Digital-Konverter (ADC) verwendet.

Als Auflösung wird die minimale Differenz der zu messenden Spannung  $\Delta U$  bezeichnet welche, benötigt wird, um den vorherigen oder nächsten Digitalwert (n-1, n, n+1) im ADC zu erzeugen.

Es findet Verwendung:

Zum Auslesen des Drucksensors RPM80103, welcher ein analoges Ausgangssignal von 0-10 V für einen Bereich von 0-100 Torr (0-133,322 mbar) liefert, wird ein ADC Kanal des Prozessleitsystems Siemens S7 verwendet. Dieser ADC ist in der Lage, Spannungen von -10 V ... +10 V zu messen und besitzt eine Auflösung von 16 bit. Da das Sensor-Ausgangssignal nur von 0...10 V geht, halbiert sich der Messbereich ( $1/2^1 = 1/2$ ). Es geht also ein Bit Auflösung verloren (6.1).



**Abbildung A.1: Zur Definition der Auflösung eines Analog-Digital-Konverters.**

$\Delta U$  bezeichnet die Spannungsdifferenz am ADC Eingang welche notwendig ist, um bei der Digitalisierung einen Wert vor oder zurück zu gehen. n bezeichnet den vom ermittelten Wert.

---

$$\frac{2^{16} \text{ bit}}{2^1} = 2^{15} \text{ bit} = 32768 \quad (6.1)$$

Daraus ergibt sich dann die tatsächliche Auflösung zu:

$$\Delta p_{\min} = \frac{133,322 \text{ mbar}}{32768} = 4,07 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \quad (6.2)$$

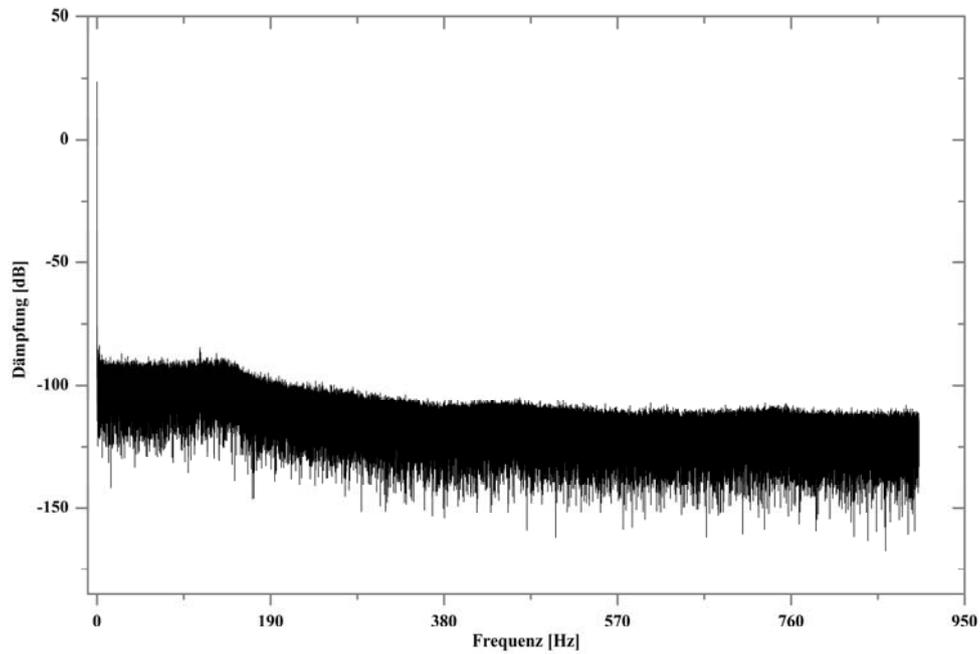
Der zweite hochpräzise Drucksensor, RPM80102, ist baugleich zu RPM80103. Er liefert also ebenfalls ein analoges Ausgangssignal von 0-10 V für einen Bereich von 0-100 Torr (0-133,322 mbar). Jedoch wird RPM80102 nicht direkt von der Siemens S7 ausgelesen, sondern von einem Auslesegerät des Herstellers MKS, welches dann die Daten digital über eine serielle Schnittstelle (RS-232) an das Prozessleitsystem übermittelt. Der im Auslesegerät verwendete ADC besitzt eine Auflösung von 18 bit. Auch dort ist es möglich, negative Werte anzeigen zu lassen, was wiederum zu einem „Verlust“ von einem Bit Auflösung führt. Effektiv genutzt werden also 17 bit, was nach (6.3) zu einer Auflösung führt von:

$$\Delta p_{\min} = \frac{133,322 \text{ mbar}}{131072} = 1,017 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \approx 1 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \quad (6.3)$$

Damit ergibt sich die Klassenbreite der gezeigten Histogramme zu:

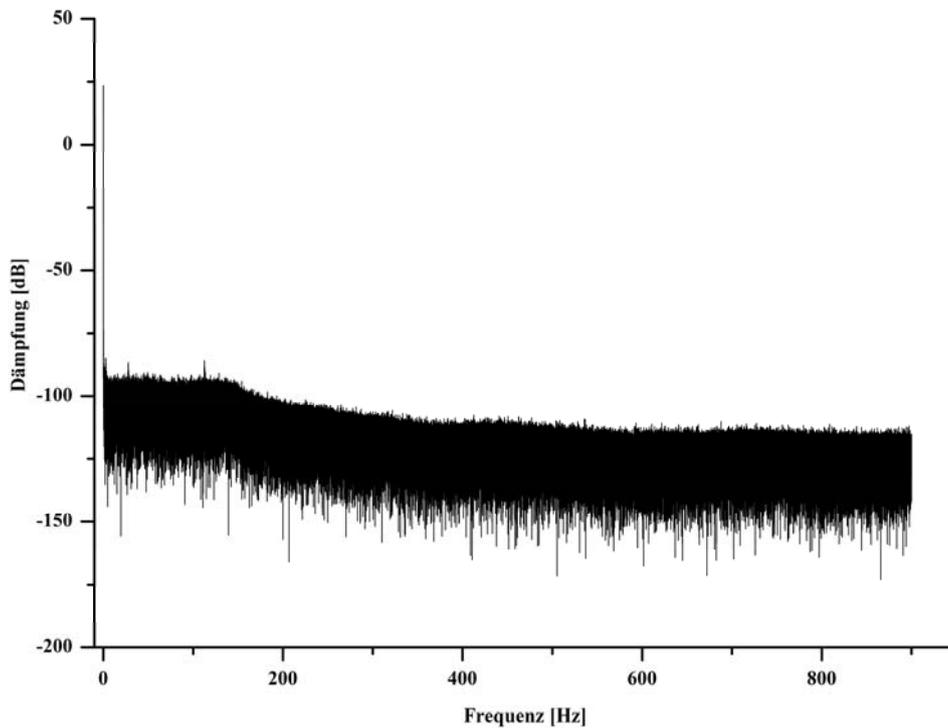
- ◆  $4 \cdot 10^{-3}$  mbar für RPM80103
- ◆  $1 \cdot 10^{-3}$  mbar für RPM80102

### Anhang D - Fourierspektren der Runs 4 und 5 ([dB] über [Hz])



**Abbildung A.2: Fourierspektrum der Daten aus Run 4.**

Dargestellt ist das Fourierspektrum, gewonnen aus Daten des Runs 4, in welchem die Dämpfung über der jeweiligen Frequenz aufgetragen wurde. Zu erkennen ist der  $1/f$  Abfall ab ca. 150 Hz.



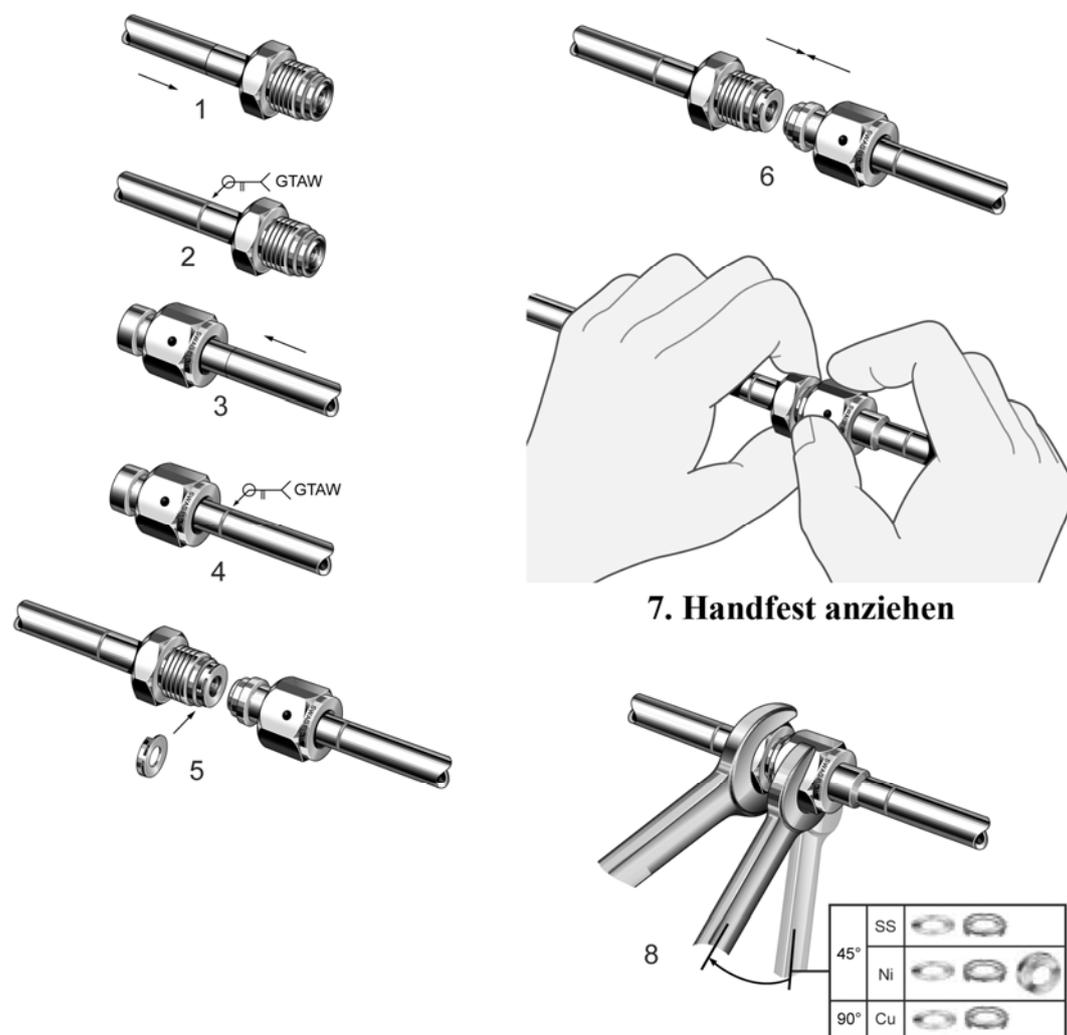
**Abbildung A.3: Fourierspektrum der Daten aus Run 5.**

Dargestellt ist das Fourierspektrum, gewonnen aus Daten des Runs 5 in welchem die Dämpfung über der jeweiligen Frequenz aufgetragen wurde. Zu erkennen ist der  $1/f$  Abfall ab ca. 150 Hz.

## Anhang E - Überblick über die VCR und CF Verbindungstechnik

Abbildung A.4 zeigt die Prozedur beim Herstellen einer VCR gedichteten Rohrverbindung. Es wird dabei eine Edelstahl- oder Kupferdichtscheibe zwischen zwei Flanschen gequetscht. Die Flansche besitzen auf der Dichtfläche eine kleine, gerundete Erhebung, welche von beiden Seiten in das Material der Dichtung drückt wird und dadurch dichtet. Aufgrund der Geometrie der Dichtfläche sind Dichtscheiben mehrmals verwendbar.

Diese Art der Dichtung findet in den Aufbauten des TLK zu über 95 % Anwendung, hauptsächlich in Edelstahl gedichteter Ausführung.



**Abbildung A.4: Swagelok VCR Verbindungstechnik.**

Bei dieser Art der Rohrverschraubung wird eine Dichtscheibe aus Edelstahl (alternativ auch Kupfer) zwischen zwei Rohrflansche gelegt (5) und dazwischen gequetscht (8). Dichtscheiben sind mehrmals verwendbar. Die Abbildungen stammen aus dem Swagelok Produktkatalog (2009).

Bei der CF-Technik sind die Flansche mit Schneidkanten ausgestattet (im Gegensatz zu den gerundeten Kanten der VCR Technik), welche beim Anziehen der Verbindung ein Stückweit in das Dichtmaterial hineingepresst werden und hierdurch abdichten. Metallische Dichtringe können bei diesem System nur einmal eingesetzt werden. Als Dichtungsmaterial kommt meistens Kupfer zum Einsatz.

Je nach Flanschdurchmesser variiert die Anzahl der zur Verschraubung benötigten Schrauben sowie deren Anzugsmoment. Bei kleineren Flanschen werden die Schrauben dem Uhrzeigersinn folgend zweimal nacheinander angezogen, bei größeren Flanschen ist ein anderes, vom Hersteller vorgeschriebenes, Schema einzuhalten.

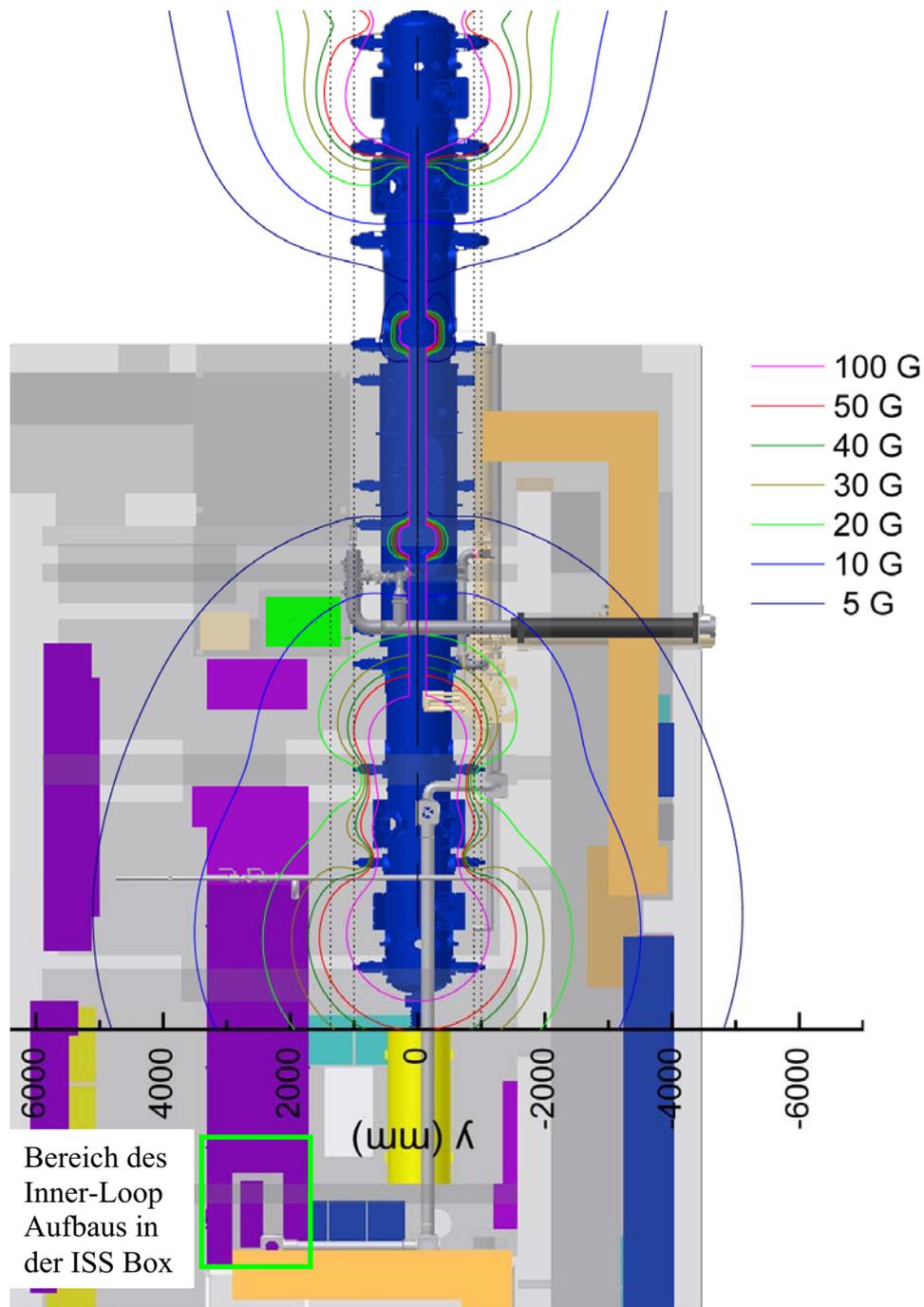
CF Flansche werden im TLK in der Regel dann eingesetzt, wenn in dem benötigten Durchmesser keine Dichtungen in VCR Technik mehr erhältlich sind (VCR Technik bis max. 1,5 ").



**Abbildung A.5: CF-Flansch (Rohr und Blinddeckel) mit Kupferdichtscheibe.**

Dargestellt ist ein in CF-Technik ausgeführter Flansch mit passender Kupferdichtung. Die Dichtung wird vor dem Zusammenbau zentrisch in die Vertiefung des Flansches gelegt. Dort wird dann die Schneidkante des Flansches mit Hilfe von mehreren Schrauben in die Kupferdichtung geschnitten.

## Anhang F – Magnetfeldkarte im Bereich der ISS-Box



**Abbildung A. 6: Magnetfeldkarte im Bereich der ISS Handschuhbox im TLK Gebäude.**  
 Dargestellt sind die Berechneten Magnetfeldlinien, hervorgerufen durch die Magnete des WGTS Kryostaten. Grün markiert im unteren Bildbereich ist die Region der ISS Handschuhbox, in welcher der Inner Loop Aufbau eingebaut ist. Die Berechnung der Magnetfeldlinien erfolgte ohne Berücksichtigung von Schaltschränken, Baustahl in der Decke/Wänden, der ISS Box selbst, etc.

**Anhang G - Datenblätter von Sensoren, Pumpen, Ventilen (u. A. zur  
Volumenbestimmung)**

- ◆ Drucksensor MKS 690-er Serie
- ◆ Drucksensor MKS 700-er Serie
- ◆ Drucksensor MKS 870-er Serie
- ◆ Drucksensor MKS 626A/627B/628B Serie
- ◆ Datenblatt zu Regelventil VAI80106
- ◆ Datenblatt zu Eckventil (verwendet an Permeator- und TBN80100-  
Vakuumananschluss) zur Volumenberechnung
- ◆ Technische Zeichnung MKS Flowcontroller (RFY80206) zur Volumen-  
berechnung
- ◆ Datenblatt Turbomolekularpumpe Pfeiffer TMU 200M
- ◆ Datenblatt Normetex Spiraltaumelpumpe
- ◆ Dokumentation und Datenblatt zu Metall-Bellows Pumpe
- ◆ Detaillierter Flussplan des Inner Loop inklusive Loopino

## Appendix A: Product Specifications

Datenblatt zu MKS690A

Ambient Operating Temperature	15° to 40° C (59° to 104° F)
Accuracy	
690	0.12% of reading ±zero/span coeff.
Standard	
Optional	0.08% of reading ±zero/span coeff.
All ranges	0.05% of reading ±zero/span coeff.
1, 10, 100, and 1000 Torr units only	
698	0.12% of reading ±zero/span coeff.
Standard	
Optional	0.08% of reading ±zero/span coeff.
All ranges	0.15% of reading ±zero/span coeff.
1, 10, 100, and 1000 Torr units only	0.2% of reading ±zero/span coeff.
	0.05 of reading ±zero/span coeff.
CE Mark Compliance <sup>2</sup>	EMC Directive 89/336/EEC
Full Scale Pressure Ranges (Torr)	
690	0.1, 1, 10, 100, 1K, 5K, 10K, 15K, 20K, 25K
698	0.1, 1, 10, 100, 1K Torr
Inlet Tube Fitting(s)	Cajon <sup>®</sup> 4-VCR <sup>®</sup> (female) orbitally butt welded
Line Pressure Effects on Span	
690	N/A
698	<0.010% / 15 psi <sup>3</sup>
Maximum Line Pressure	
690	N/A
698	150 psig
Measurement Side (P <sub>x</sub> ) Media Compatibility	Any gas compatible with Inconel <sup>®</sup> , 304 SS

P <sub>x</sub> Overpressure	125% FS or 40 psia (whichever is greater) 12.5% FS or 45 psia (whichever is greater)
100 mTorr (0.1 T) Units All other ranges	
Reference Side (P <sub>z</sub> ) Media Compatibility	
690	N/A
698	Any dry gas compatible with Inconel <sup>®</sup> , 304/306 SS, Fosterrite, Palladium
Reference Side Volume	
690	N/A
698	2.5 cc
Resolution (of FS)	1 x 10 <sup>-6</sup>
Sensor Temperature	Regulated at 45° C
Sensor Type	Single sided, dual electrode
Temperature Effects on Span	
100 mTorr (0.1 T) Units All other ranges	<0.010% R / °C (100 ppm) <0.002% R / °C (20 ppm)
Temperature Effects on Zero	
100 mTorr (0.1 T) Units All other ranges	<30 PPM, F.S. / °C <4 PPM, F.S. / °C <15 PPM, F.S. / °C
Temperature Effects on Zero	
100 mTorr (0.1 T) Units All other ranges	<30 PPM, F.S. / °C <4 PPM, F.S. / °C <15 PPM, F.S. / °C
Time Constant with Signal Conditioner in:	
Fast Position	> 25 ms
Std Position	40 ms
Slow Position	400 ms
Type of Measurement	
690	Absolute
698	Differential, Gage
Useable Resolution	5 decades
Volume (P <sub>x</sub> )	
690	2.5 cc
≥ 1000 T Units	14 cc
5K to 25 K Units	3.5 cc
698	

Due to continuing research and development activities, these product specifications are subject to change without notice.

<sup>2</sup>An overall metal braided shielded cable, properly grounded at both ends, is required during use. The Type 690/698 units are only CE compliant when used with the Type 670 Signal Conditioner/Readout.

<sup>3</sup>For 100 mTorr units only.

# Appendix A: Product Specifications

## 700 Series Specifications

Accuracy	1% of Reading
Ambient Operating Temperature Range	0° to 50° C (32° to 122° F)
Burst Pressure	10 times full scale or 1000 psia/g, whichever is greater; 5 times full scale to 3000 psia/g
CE Compliance <sup>1</sup>	EMC Directive 89/336/EEC
Configuration	Single-ended or Flow-through
Fittings	
Flow-Through	¼" Tube; Swagelok® 4-VCR® fixed male
Single-Ended	½ Tube; Swagelok 4-VCR male/female; Swagelok 8-VCR female; NW-16-KF (up to 1200 Torr only)
Full Scale Pressure Ranges	
Absolute	10 Torr through 3000 psia
Gage	50 psig through 3000 psig
Compound	30-0-30 through 30-0-3000 inHg/psig
Input Required	
0 to 5 Volt output	10.8 VDC to +32 VDC (regulated if below 13 VDC) @ 10 mA max.
0 to 10 Volt output	+13 VDC to +32 VDC @ 10 mA max.
two wire 4 to 20 mA	13 to 36 VDC excitation (32 maximum across the transducer)
Material Exposed to Gas	Incoloy®, Inconel®/SST with Swagelok VCR male fitting, Inconel with ¼" diameter tubulation
Non-incandive <sup>2</sup>	NEC/NFPA 70 Class I Division II, Groups A & B

<sup>1</sup> An overall metal braided shielded cable, properly grounded at both ends, is required during use.

<sup>2</sup> Applies to 4 to 20 mA units only.

Output	into >10 K ohm load into >10 K ohm load into 0 to 900 ohm load, depending on excitation. See Figure 6, page 30. <i>Note:</i> 32 Volt maximum across the transducer.
0 to 5 VDC	
0 to 10 VDC	
two wire 4 to 20 mA with 13 to 36 VDC excitation	
Overpressure Limit	45 psia or 2 times full scale, whichever is greater
Temperature Coefficients	
Zero	0.02% of F.S./ °C
Span	0.04% of Rdg./ °C
Weight	
Flow-through	12.3 oz. (349 g)
Single-ended	< 10 oz. (< 283 g)

## Additional Specifications for the Type R700 Pressure Relay System

Contact Ratings	24 Volts AC/DC @ 1 Amp resistive
Dimensions	6.735" H x 3.31" L x 2.68" D (17.1 cm H x 8.4 cm L x 6.8 cm D)
Hysteresis	0.3% Full Scale, maximum
Input Required	±15 VDC ±5% @ <75 mA
LED Status	Green when energized No color when de-energized
Trip Point Action	User-selectable, either: Energized when the pressure is <i>above</i> the trip point <i>or</i> Energized when the pressure is <i>below</i> the trip point
Trip Point Setting Output	0 to 10 VDC (corresponding to 0 to 100% F.S.) for each trip point setting

Due to continuing research and development activities, these product specifications are subject to change without notice.

## Appendix A: Product Specifications

Datenblatt zu MKS87B

Reverse Wire Protection	Immune to reverse power wiring effects
-------------------------	--

### Performance Specifications

Accuracy	1% of Reading	
Drift	< 50 psia	≥ 50 to 3000 psia
Short Term	< 0.04% FS / day	< 0.02% FS / day
Long Term	±0.12% F.S. / 6 months	±0.06% F.S. / 6 months
Leak Rate		
Inboard	10 <sup>-9</sup> scc/sec He	
Outboard	< 1 ppm above background	
Sensor Response Time	< 0.1 msec calculated	
Temperature Coefficient		
Zero	< 50 psia	≥ 50 to 3000 psia
Span	0.04% of FS/°C	0.02% of FS/°C
	0.08% of Reading/°C	0.04% of Reading/°C

### Electrical Specifications

CE Compliance <sup>1</sup>	EMC Directive 89/336/EEC	
Input Power Requirement	12 VDC minimum to 36 VDC maximum, regulated to ± 5% (dependent on output configuration)	
0 to 5 V Output	+12 VDC to +32 VDC ±5% (regulated if below 13 VDC) @ 10 mA maximum	
0 to 10 V Output	+13 VDC to +32 VDC ±5% @ 10 mA maximum	
Two wire, 4 to 20 mA Output	+13 VDC to +36 VDC excitation (32 VDC maximum across the transducer)	
Output		
0 to 5 VDC	into >10 K ohm load	
0 to 10 VDC	into >10 K ohm load	
Two wire 4 to 20 mA with +13 to +36 VDC excitation	into 0 to 900 ohm load (depending on excitation)	

### Physical Specifications

Attitude (Orientation) Sensitivity	Fully functional without regard to operating orientation < 0.15% of reading per 180° of rotation
Burst Pressure	10 times full scale 5 times full scale
Configuration	Single-ended Flow-through
Connectors	6' or 10' Flying Lead 4-Pin male PTO Bendix (2 configurations) at the end of a 9" flying lead 9-Pin standard or 15-pin high density male Type "D" at the end of a 9" flying lead
Fittings	½" Tube Stub ¼" Weld Stub Swagelok® 4-VCR® male, rotatable 4-VCR female ¼" Butt Welded "T"
Type 870	¼" Weld Stub (2 lengths) 4-VCR male, non-rotatable (2 lengths) 4-VCR female, rotatable 4-VCR female, non-rotatable 4-VCR male, non-rotatable / ¼" Tube stub
Type 872	1000 Torr, 60 psia, 100 psia, 250 psia, 1000 psia, 3000 psia
Full Scale Pressure Ranges	
Internal Volume	< 1.0 cc < 2.0 cc
Type 870	
Type 872	
Materials Exposed to Gas	Inconel/Incoloy, polished and passivated
Wetted Surfaces	< 5 μinch (<0.125 μm) Ra, maximum
Nonincendive Device Approval	FM3611-1986; Class I, Division 2, Groups A, B, C, & D

<sup>1</sup> An overall metal braided shielded cable, properly grounded at both ends, is required during use.

**Performance Specifications**

Accuracy (non-linearity, hysteresis, and non-repeatability) Analog and Profibus version	Range (mbar/Torr) <sup>1</sup>	Standard Accuracy (% of Reading)	
626 (ambient)	0.1, 1, 2, 10, 100, 1000	0,5 % 0,25% opt. for ranges ≥10 mbar/Torr: 0,15%	
627 (45 °C)	0.02 0.05, 0.1 1, 2, 10, 100, 1000	0,25 0,15 0,12	
628 (80 °C)	0.05, 0.1 1, 2, 10, 100, 1000	0,5 0,25	
Temperature Coefficients	Range (mbar/Torr)	Zero (% Full Scale/°C)	Span (% Rdg/°C)
626	0.1 1 2 and 5 mbar/Torr 10 mbar/Torr and up	0,050 0,015 0,010 0,005	0,20 0,04 0,04 0,04
627	0.02 0.05 0.1, 0.25, 0.5 1 and up	0,030 0,015 0,005 0,002	0,02 0,02 0,02 0,02
628	0.05 0.1, 0.25, 0.5 1 and up	0,020 0,010 0,002	0,02 0,02 0,02
Burst Pressure	5 times full scale or 90 psia, whichever is greater		
Leak Integrity	Internal to external <10 <sup>-9</sup> scc/sec He 100 million cycles to FS without leakage—1 million cycles for ≤1 mbar/Torr		
Overpressure Limit without Damage	45 psia (310 kPa)		
Resolution	0.001% Full Scale		
100% Time Response	20 ms (40 ms for ranges < 1 mbar / Torr )		
Media Compatibility	Any gas compatible with Inconel 600 and 316 SS		

**Appendix A: Product Specifications****Environmental Specifications**

Overpressure Limit 1000 Torr to 500 psi 501 to 3000 psi	1.5 times full scale 1.2 times full scale
Weight (any configuration)	< 10 oz. (284 g)
Zero Adjustment Access	Located on the side of the unit, 45° from flow direction

**Environmental Specifications**

Environmental Options	Standard unit (indoor use) NEMA 4 compliant unit (outdoor use; weather resistant)
Operating Humidity Range	25 to 80% relative humidity, non-condensing
Operating Temperature Range	0° to 50° C (32° to 122° F)

Due to continuing research and development activities, these product specifications are subject to change without notice.

<sup>1</sup> Some versions may be not available with range full scale below 1 mbar/Torr.

Für extremes UHV und/oder aggressive Medien  
 Offen bis 450°C, geschlossen bis 350°C ausheizbar  
 10 000 Zyklen wartungsfrei  
 Hoher Leitwert  
 Strahlungsbeständig bis 10<sup>8</sup> Gy



## Gehäusematerial

nichtrostender Stahl

## Handantrieb

Sechskantkopf

DN		Bestellnummern
mm	inch	CF-R
16	5/8	57124-GE02
40	1 1/2	57132-GE02
63	2 1/2	57036-GE02
100	4	57040-GE02
160	6	57044-GE02

mit Skala: 57 . . . . . E0Z  
 mit Lagemelder 80°C: 57 . . . . . E0G

## Pneumatikantrieb

mit Lagemelder 80°C  
 mit Steuerventil

DN		Bestellnummern (Steuerspannung angeben)	
mm	inch	Pneumatik federschliessend CF-R	Pneumatik doppelwirkend CF-R
16	5/8	57124-GE41	57124-GE44
40	1 1/2	57132-GE41	57132-GE44
63	2 1/2	57036-GE41	57036-GE44
100	4	57040-GE41	57040-GE44
160	6	57044-GE41	57044-GE44

(federschliessend) (doppelwirkend)  
 ohne Lagemelder, ohne Steuerventil: 57 . . . . . E11 57 . . . . . E14  
 mit Lagemelder 80°C, ohne Steuerventil: 57 . . . . . E21 57 . . . . . E24

DN 10, federschliessend  
 Ventil bis 250°C ausheizbar  
 «kompakt»

Flansche: Standard CF-R 16 (andere auf Anfrage)

## 1.2 Specifications

Datenblatt zu Regelventil VAI80106

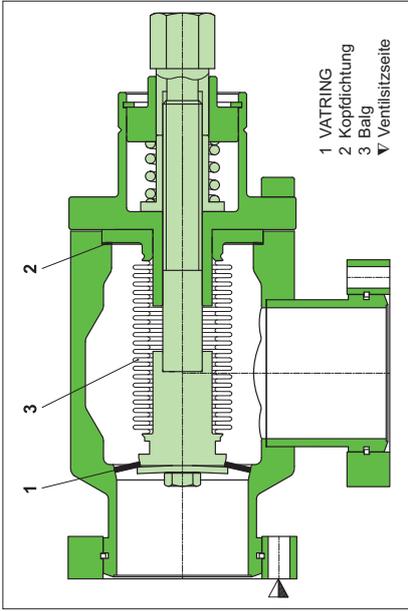
- Flow volume** 10 to 50000 sccm full scale N2 equivalent
- Flow control resolution (Typical)** 0.2% of FS < 100 SCCH  
0.1% of FS > 100 SCCM
- Max. Inlet pressure** 10 kgf/cm2G
- Response time** 15 m sec
- Operating current** 150 mA (max.)
- Internal leak standard** 1% of FS or less, N2 (differential pressure 1kgf/cm2G)
- External leak standard** 1 x 10<sup>-10</sup> atm.cc/see (He) or less
- Operating temperature** A Specified temperature in the range of 15 to 150 deg.C (adjustment is required at the different operating temperature)
- Valve type** Normally Closed (metal sealed solenoid)
- Wetted material** SUS 316, corrosion-resistant magnetic, material, PTFE
- Seal material** Metal( Ni seal)
- Piping joints** 1/4" VTF male thread (VCR compatible)
- Weight** About 1.8 kg

**Dichtungen**

Teller: Metall  
Kopf: Metall

**Durchführung**

Balg



**Merkmale**

VATRING-System: Dichtflächen werden nur elastisch verformt  
Größtmöglicher Leitwert für die Nennweite  
Schliessen auf Anschlag — ohne Drehmomentschlüssel (Reihe 571)

**Technische Daten**

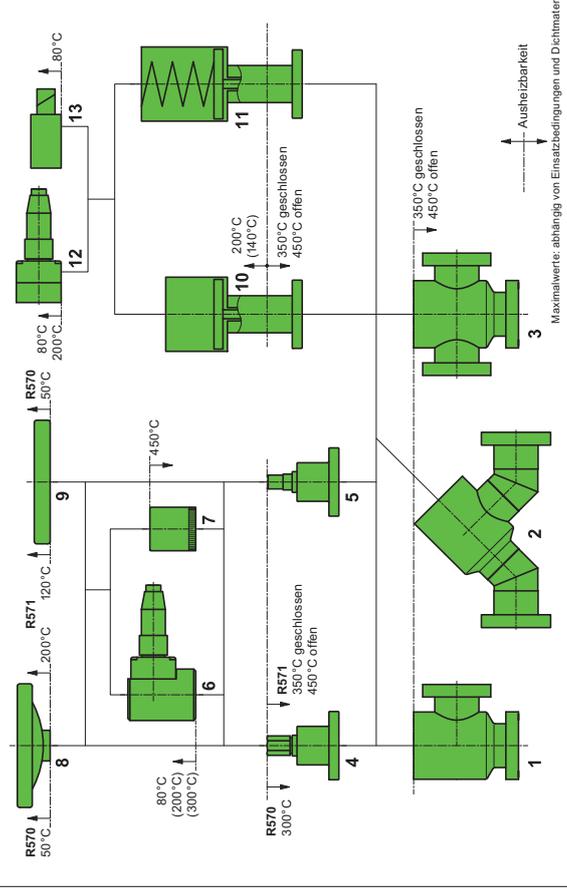
Weitere technische Daten siehe nächste Seite

Dichtheit: Gehäuse, Ventilsitz <math>< 1 \cdot 10^{-10}</math> mbar   
 Druckbereich UHV bis 5 bar (abs)  
 Differenzdruck am Ventilteller 5 bar in beiden Richtungen  
 Differenzdruck beim Öffnen 1 bar (> 1 bar bei reduzierter Standzeit)  
 Standzeit bis zur 1. Wartung 10000 Zyklen  
 Temperatur <sup>1)</sup>  
 - Ventilegehäuse DN 16 - 40  
 - Handantrieb (6K-Kopf) DN 16 - 40  
 DN 63 - 160  
 - Handrad (abnehmbar) R570 / R571  
 - Pneumatiktrieb  
 - Lagemelder  
 - Steuerventil  
 - Flexible Ausheizjacke  
 - Flexiblen Ausheizjacke  
 Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit  
 Werkstoff  
 - Ventilegehäuse, Mechanik  
 - Balg  
 Dichtung: Kopf, Teller  
 Einbaulage Metall  
 Steuerventil beliebig  
 24 V DC, 2.5 W (andere siehe «Optionen»)  
 Lagemelder: Schaltleistung  
 - Spannung  $\leq 48VAC$  oder  $\leq 24VDC$   
 - Strom  $\leq 5A$   
 Ventilstellung visuell erkennbar (mechanisch)

<sup>1)</sup> Maximalwerte: abhängig von Einsatzbedingungen und Dichtmaterialien

**Gehäuse und Antriebe – Modulare Auswahl und Ausheiztemperaturen**

- 1 Eckventil-Gehäuse, Teller, Balg
- 2 Inline-Gehäuse, Teller, Balg
- 3 T-Ventil-Gehäuse, Teller, Balg
- 4 Handantrieb mit Sechskantkopf
- 5 Handantrieb mit zylindrischem Kopf
- 6 Lagemelder für Handantrieb
- 7 Skala
- 8 Handrad für Sechskantkopf
- 9 Handrad mit Freilauf für zylindrischen Kopf
- 10 Pneumatiktrieb, doppelwirkend
- 11 Pneumatiktrieb, federschliessend
- 12 Lagemelder
- 13 Steuerventil



**Technische Daten**

DN (Nennweite)	hand			pneumatisch einfachwirkend			pneumatisch doppelwirkend															
	Leitwert im Hochvakuum	Drehmoment	Spindelumdrehungen pro Hub	Gewicht	Druck	Schliess- oder Öffnungszeit	Volumen	Gewicht	Druck	Schliess- oder Öffnungszeit	Volumen											
mm	inch	O.D.	1/2	kg	lbs	bar	psi	s	l	ft <sup>3</sup>	kg	lbs										
16	5/8	1 1/2	5	6	4.5	6	0.8	1.8	6-9	85-130	1	0.12	.004	4.6	10.1	4-5	55-70	1	0.08	.003	2.9	6.4
40	1 1/2	2 1/4	50	10	7.5	8	2.3	5	6-9	85-130	2	0.35	.011	16.5	36.5	4-5	55-70	2	0.32	.011	6	13
63	2 1/2	4 1/2	125	45	33	4.5	8	17.8	6-9	85-130	4	0.8	.028	26	57.3	4-5	55-70	2	0.55	.02	17.2	37.3
100	4	6	380	90	66	6.4	16	35.2	6-9	85-130	4	2.4	.085	58	128	4-5	55-70	4	1.5	.053	29	62
160	6	8	940	125	92	8	36	79.2	6-9	85-130	6	4.8	.17	136	299	4-5	55-70	6	3.3	.116	65	143

Optionen

- Antrieb:**
- Handantrieb mit zylindrischem Kopf
  - Pneumatikantrieb 10° Gy, 140°C ausheizbar
  - Steuerventil für Impulsansteuerung: Ventilstellung bleibt bei Stromausfall unverändert
  - Steuerventil für 12, 48 VDC  
24, 48, 100, 115, 200, 230 V 50 Hz  
24, 100, 115, 200, 230 V 60 Hz
  - Lagemelder für Hand- und Pneumatikantrieb 200°C ausheizbar
  - Lagemelder für Handantrieb 300°C ausheizbar
  - Doppelte Lagemelder  
(je 2 Schalter für die Stellungen «offen» und «geschlossen»)
- Ventil:**
- Sonderflansche nach Kundenzeichnung
  - CF-F (Fixflansch), ISO-KF, Schweisstutzen
  - Ventil mit unterschiedlichen Flanschen (z. B. CF/KF, CF/Cajon VCR)
  - Antimagnetische Ausführung mit definierter Permeabilität
  - Ventil mit verschweisstem Kopfflansch (als Vorkammerventil, für Tritium-Systeme)
  - Inline-Ventil
  - T-Ventil

**Bestellhinweis für Optionen:**

Bestell-Nr. Ventil-X (z. B. 57132-GE02-X, X = T-Ventil)

**Zubehör**

- Handrad für Sechskantkopf (DN 16 - 40)  
**Bestell-Nr.:** siehe Preisliste
- Handrad mit Rutschkupplung für Sechskantkopf (DN 63 - 100)  
**Bestell-Nr.:** siehe Preisliste
- Handrad mit Freilauf für zylindrischen Kopf (DN 16 - 40)  
**Bestell-Nr.:** siehe Preisliste
- Handrad mit Rutschkupplung und Freilauf für zylindrischen Kopf (DN 63 - 100)  
**Bestell-Nr.:** siehe Preisliste
- Verbindungsstücke zum Einbauen des Ventils: Reihe 33
- Flexible Ausheizjacke für DN 40 - 160  
**Bestell-Nr.:** H-Bestell-Nr. Ventil (z. B. H-57040-GE...)

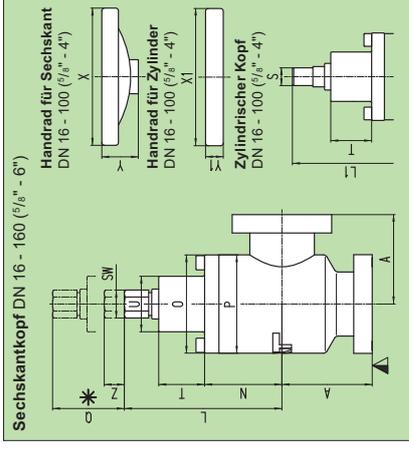
Als Heizungssteuerung empfehlen wir kommerziell erhältliche Regler mit einstellbarer Aufheizgeschwindigkeit und Temperaturbegrenzung.

Die Ausheizjacken sind ohne Thermostatelemente und ohne Thermostat ausgeführt.

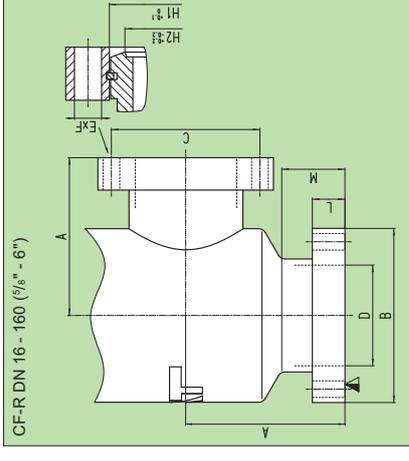
Bestehend aus Dichtungen für Teiler (VATRING) und Kopf  
**Bestell-Nr.:** siehe Betriebsanleitung oder Preisliste

**Dichtungssatz**

Handantrieb



Flanschabmessungen



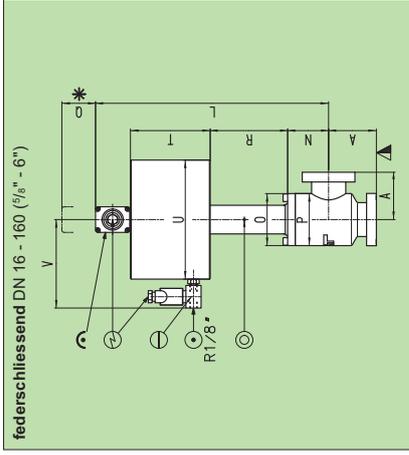
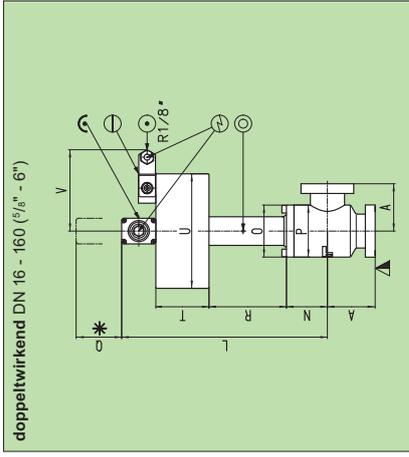
▼ Ventilsitzseite

\* benötigte Ausbauhöhe

DN	mm	inch	16	5/8	40	63	2 1/2	100	160
A	mm	inch	38	1.5	63	2.48	105	4.13	135
L	mm	inch	98.5	112	189	7.44	250	9.84	322.5
L1	mm	inch	114	4.49	119.5	4.7	189	7.44	250
N	mm	inch	50.5	54	93	3.66	130	5.12	172
O	mm	inch	54	69	103	4.05	148	5.83	202
P	mm	inch	52	69.1	100	3.94	159	6.26	220
Q	mm	inch	58	80	116	4.56	190	7.48	255
S	mm	inch	12	14	20	0.79	30	1.18	-
SW	mm	inch	13	0.51	0.87	0.87	1.06	1.42	36
T	mm	inch	33	34	67	2.64	87	3.43	112
U	mm	inch	32	39	60	2.36	68	2.68	78
X	mm	inch	62	125	250	9.84	500	19.69	-
X1	mm	inch	62	125	250	9.84	500	19.69	-
Y	mm	inch	23	33	72	2.83	80	3.25	-
Y1	mm	inch	12	16	75	2.95	95	3.74	-
Z	mm	inch	8.5	14	20	0.79	32	1.26	44
	mm	inch	0.33	0.55	0.79	1.26	1.73	2.36	3.07

DN	mm	inch	16	5/8	40	63	2 1/2	100	160
A	mm	inch	38	1.5	63	2.48	105	4.13	135
B	mm	inch	34	69.5	113.5	4.47	152	5.98	202.5
C	mm	inch	27	58.7	92.1	3.62	130.3	5.13	181
D	mm	inch	16	40	64	2.52	102	4.01	150
E x F	mm	inch	6 x 4.3	6 x 6.6	8 x 8.4	8 x 10.8	16 x 8.4	20 x 8.4	20 x 8.4
H1	mm	inch	21.4	48.3	82.5	3.25	120.65	4.75	171.45
H2	mm	inch	18.5	42	77.4	3.05	115.5	4.55	166
L	mm	inch	7.3	13	19	0.75	21.5	0.85	24
M	mm	inch	19	25	46	0.98	60	2.36	60
	mm	inch	0.75	0.98	1.81	2.36	3.07	4.01	5.9

**Pneumatikantrieb**



- ▽ Ventilsitze
- \* benötigte Ausbauhöhe
- ⊖ Pressluftanschluss
- ⊕ elektrischer Anschluss
- ⊗ mechanische Stellanzeige
- ⊙ Leckschubnring
- ⊖ Notbetätigung

Flanschabmessungen siehe Seite 150

DN	16	40	63	100	160
mm	16	40	63	100	160
inch	5/8	1 1/2	2 1/2	4	6
A	38	63	105	135	167
mm	229.5	271	380	415.5	497
inch	9.04	10.67	14.96	16.36	19.57
L	50.5	54	91.5	128.5	172
mm	1.99	2.13	3.6	5.06	6.77
inch	0.078	0.084	0.142	0.200	0.267
N	54	69	102	148	202
mm	2.13	2.72	4.02	5.83	7.95
inch	0.084	0.107	0.158	0.230	0.313
O	36	69	102	159	220
mm	1.42	2.72	4.02	6.26	8.66
inch	0.056	0.107	0.158	0.247	0.339
P	50	69	107	160	210
mm	1.97	2.72	4.21	6.3	8.27
inch	0.078	0.107	0.165	0.248	0.326
Q	80	102	113	109.5	130
mm	3.15	4.02	4.45	4.31	5.12
inch	0.124	0.158	0.175	0.169	0.201
R	54	70	111	132.5	150
mm	2.13	2.76	4.37	5.22	5.91
inch	0.084	0.108	0.172	0.205	0.233
T	98	152	192	238	278
mm	3.86	5.98	7.56	9.37	10.94
inch	0.152	0.235	0.298	0.369	0.431
U	80	108	132	132	100
mm	3.15	4.25	5.2	5.2	3.94
inch	0.124	0.167	0.205	0.205	0.155
V					

Für extremes UHV  
 Offen und geschlossen bis 300°C  
 ausheizbar  
 Wartungsfrei  
 Hoher Leitwert  
 Strahlungsbeständig bis 10<sup>8</sup> Gy



**Gehäusematerial**  
 nichtrostender Stahl

**Handantrieb**

Sechskantkopf

DN	inch	Bestellnummern
16	5/8	CF-R
40	1 1/2	54024-GE02
63	2 1/2	54032-GE02
		54036-GE02

Handrad zum Aufsetzen auf Sechskantkopf: Bestell-Nr. 240039 (nur für DN 16 + 40)

**Technische Daten**

Dichtheit: Gehäuse, Ventilsitz < 5 · 10<sup>-10</sup> mbar ls<sup>-1</sup>  
 UHV bis 2 bar (abs)  
 Druckbereich 2 bar in beiden Richtungen  
 Differenzdruck am Ventilteller 1 bar (>1 bar bei reduzierter Standzeit)  
 Differenzdruck beim Öffnen 1 bar (>1 bar bei reduzierter Standzeit)  
 Leitwert im Hochvakuum 5 / 50 / 105 ls<sup>-1</sup>  
 - DN 16 / 40 / 63 1000 Zyklen  
 Standzeit schliessen auf Anschlag  
 Schliesskraft 6 / 15 / 9  
 Spindelumdrehungen pro Hub ≤ 300°C  
 - DN 16 / 40 / 63 ≤ 60°C h<sup>-1</sup>  
 Temperatur: Ventil <sup>1)</sup>  
 Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit  
 Werkstoff - Ventilgehäuse, Mechanik  
 - Baig AISI 304L (1.4306), AISI 316L (1.4435)  
 AISI 316L (1.4404)  
 Metall  
 Dichtung: Kopf, Teller  
 beilebig  
 Einbaulage  
 Ventilstellung  
 visuell erkennbar (mechanisch)  
 Gewicht: DN 16 / 40 / 63  
 0.4 / 2.2 / 6.2 kg  
 0.9 / 4.9 / 13.7 lbs

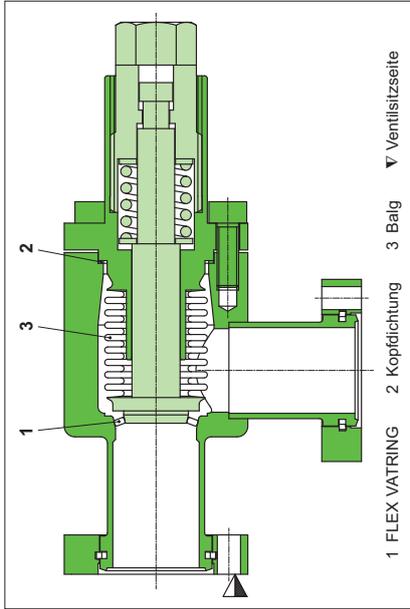
<sup>1)</sup> Maximalwerte, abhängig von Einsatzbedingungen und Dichtmaterialien

**Dichtungen**

Teller: Metall  
Kopf: Metall

**Durchführung**

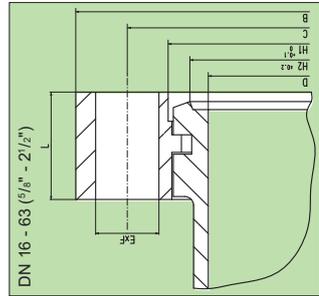
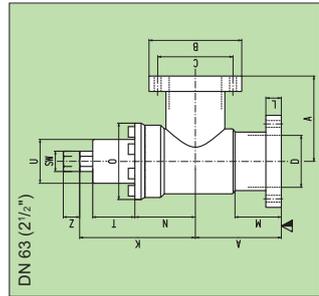
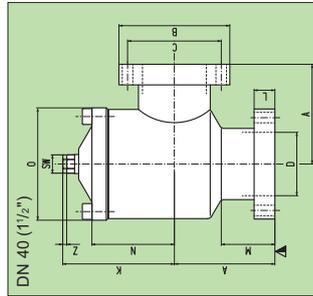
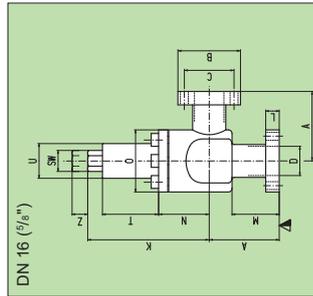
Balg



**Merkmale**

«FLEX VATRING» System: Dichtelemente werden nur elastisch verformt  
Schliessen auf mechanischen Anschlag – kein Drehmomentschlüssel erforderlich

**Abmessungen**



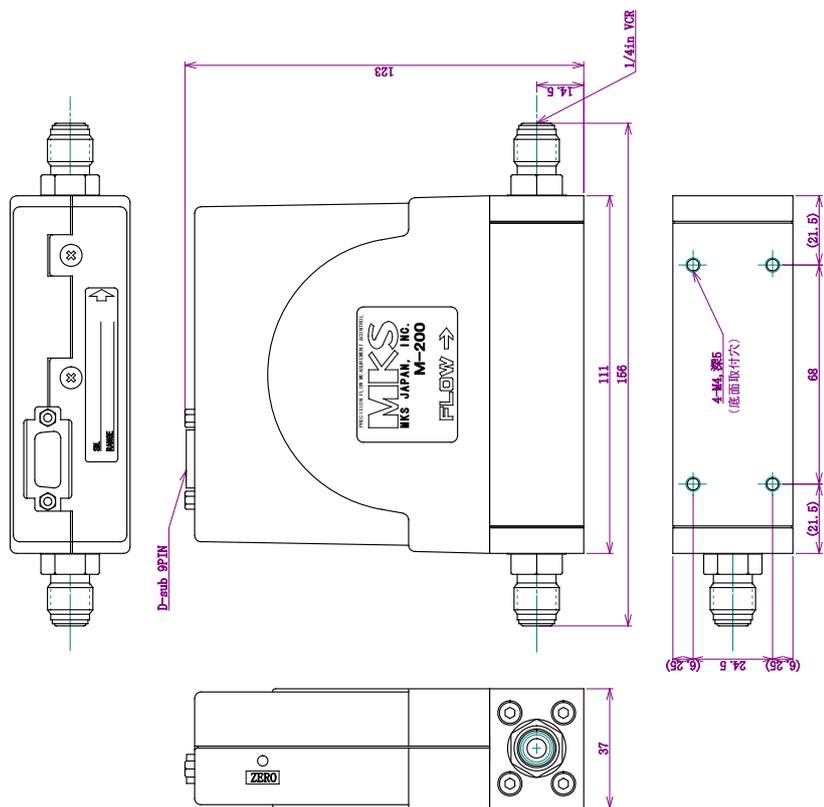
	16	40	63
DN	mm inch	5/8 1 1/2	2 1/2
A	mm inch	38 1.5	63 2.48
B	mm inch	34 1.34	69.5 2.74
C	mm inch	27 1.06	58.7 2.31
D	mm inch	16 0.63	40 1.57
E x F		6 x 4.3	6 x 6.6
H1	mm inch	21.4 0.84	48.3 1.9
H2	mm inch	18.5 0.73	42 1.65
K	mm inch	66 2.6	70 2.76
L	mm inch	7.3 0.29	13 0.51
M	mm inch	25.6 1	33.6 1.32
N	mm inch	27.5 1.08	51.7 2.04
O	mm inch	34 1.34	71 2.8
SW	mm inch	10 0.39	10 0.39
T	mm inch	30.5 1.2	-
U	mm inch	19 0.75	-
Z	mm inch	8.5 0.33	2.5 0.1

1.2. Specifications

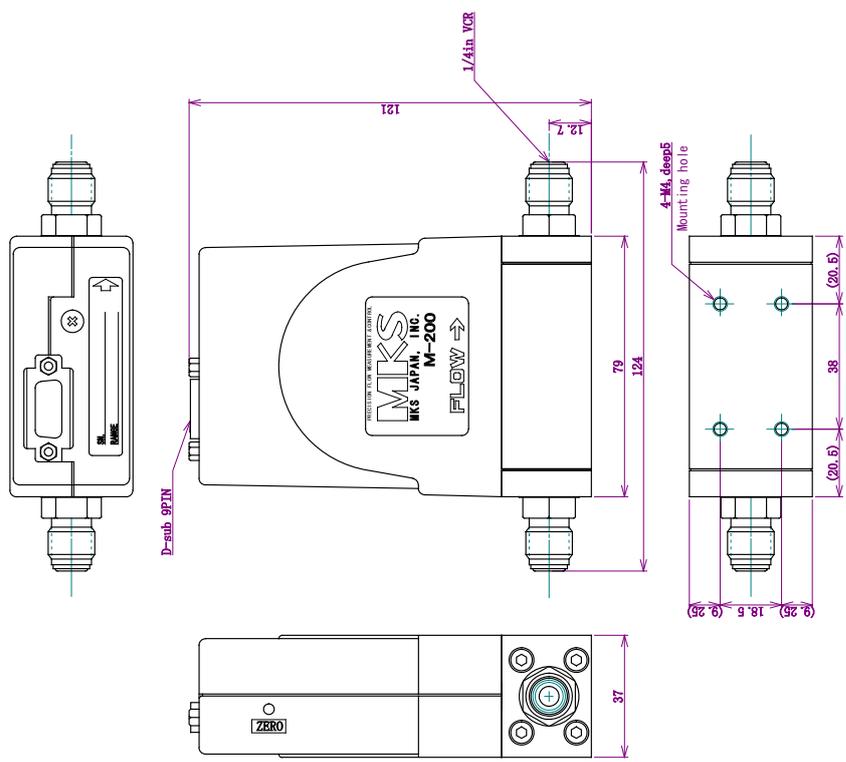
Type	M-200
Full scale(N2 equivalent)	10- 20,000 SCCM
Control range	1-100% of F.S.
Accuracy	Within ±1% of F.S. (calibration gases)
Repeatability	Within ±0.2% of F.S.
setting time	1 sec to ± 2% of the set value (0-100% typical value)
Operation differential pressure	7-40psig , 15-40psig (over 5 SLM)
Maximum inlet pressure	150psig
Leak integrity	1 x 10 <sup>-10</sup> atm.cc/see He or less
Operating temperature range	15-45 ° C
Temperature coefficient	0.1%/ ° C or less
Input/command signal	0-5 V DC from < 20 Kohm source
Output signal/mln.	load 0-5 V DC into > 10 KΩ
Valve type	Normally open (piezo-actuated diaphragm valve)
Wetted material	SUS-316L
Fittings	1/4 VCR
Dimensions fitting center height	12.7mm 14.5mm(over 5SLM)
Dimensions fitting face to face	124 mm 156 mm(over 5SLM)
Mounting screw hole	38 x 18.5 mm (M4) 68 x 24.5 m (M4, over 5SLM)
Surface finish roughness	Rmax 0.5 vm (typical value)
Weight	0.9kg 1.3 kg(over 5SLM)

Specifications shall be changed without notice

Dimensions;  
(over 5000 sccm)

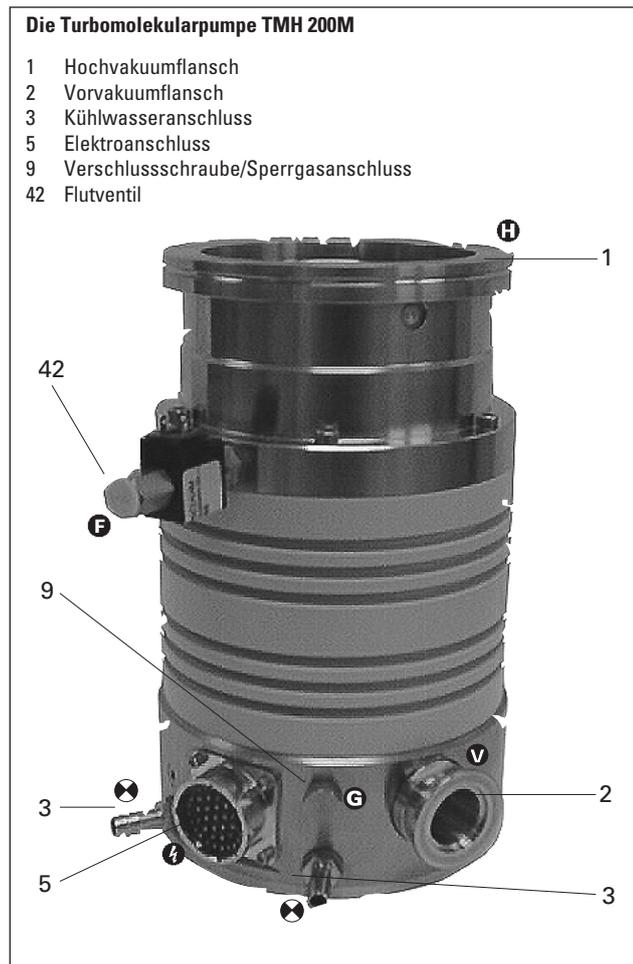


Dimensions ;  
(up to 5 sccm)



## 2. Kennenlernen der Pumpen TMH 200M / TMU 200M

### 2.1. Hauptmerkmale



#### Umgebungsbedingungen

Die Turbopumpe ist unter Einhaltung folgender Umgebungsbedingungen zu installieren:

#### Aufstellungsort:

wetterschutz  
(Innenräume)

#### Temperatur:

+5 °C bis +40 °C (bei  
Wasserkühlung bis +50 °C).

#### Rel. Luftfeuchte:

max. 80 %, bei  $T \leq 31$  °C  
bis max. 50% bei  $T \leq 40$  °C

#### Luftdruck:

77 kPa - 106 kPa

#### Aufstellungshöhe:

max. 2000 m

#### Verschmutzungsgrad:

2

#### Überspannungskategorie:

II

#### Anschlussspannung:

70 VDC  $\pm 5\%$

#### Kühlung

Standardmäßig: Wasserkühlung

Alternativ: Luftkühlung als Zubehör

Gasdurchsatz und Vorvakuumdruck reduziert; siehe unter 8. Technische Daten.

#### Lager

Hochvakuumseite: verschleißfreies Permanentmagnet-Lager.

Vorvakuumseite: verschleißfreies, elektromagnetisches  
Radial- und Axiallager.

zusätzlich: trockenlaufende Fanglager

## 8. Technische Daten

Größe	Einheit	TMH 200 M	TMU 200 M
Anschlussnennweiten: Eingang Ausgang Flutanschluss		DN 100 ISO-K	DN 25 ISO-KF/G 1/4" G 1/8" DN 100 CF-F
Nennzahl	Hz (1/min)		833 (50 000)
Standby-Drehzahl	Hz (1/min)		555 (33 000)
Hochlaufzeit	min		1,5
Max. Schalldruckpegel <sup>1)</sup>	dB (A)		40
Enddruck Vorpumpe	mbar		< 10
Integrale Leckrate (He) <sup>2)</sup>	mbar l/s		< 2 · 10 <sup>-8</sup>
Max. zulässige Rotortemperatur	°C		100
Zulässige eingestrahlte Wärmeleistung	W		23
Saugvermögen für:			
Stickstoff N <sub>2</sub>	l/s		180
Helium He	l/s		150
Wasserstoff H <sub>2</sub>	l/s		105
Kompressionsverhältnis für:			
N <sub>2</sub>			> 10 <sup>10</sup>
He			3 · 10 <sup>7</sup>
H <sub>2</sub>			5 · 10 <sup>5</sup>
Max. Vorvakuumdruck für:			
N <sub>2</sub>	mbar		12
He	mbar		12
H <sub>2</sub>	mbar		10
Max. Gasdurchsatz <sup>3)</sup>			
bei Wasserkühlung			
N <sub>2</sub>	mbar l/s		17
Ar	mbar l/s		5
He	mbar l/s		32
bei Luftkühlung			
N <sub>2</sub>	mbar l/s		2
Ar	mbar l/s		1
Max. Gasdurchsatz bei 0,1 mbar <sup>4)</sup>			
N <sub>2</sub>	mbar l/s		4
Ar	mbar l/s		5
He	mbar l/s		4
Eckpunkte Leistungskennlinie <sup>5)</sup>			
A	W / Hz		250/833
B	W / Hz		250/833
C	W / Hz		250/833
D	W / Hz		250/833
Enddruck <sup>6)</sup>			
mit Drehschiebervakuumpumpe	mbar		< 5 · 10 <sup>-10</sup>
mit Membranpumpe	mbar		< 1 · 10 <sup>-8</sup>
Max. Kühlwasserbedarf bei Wassertemperatur 15 °C <sup>7)</sup>	l/h		120
Kühlwassertemperatur	°C		5 - 25
Zulässige Umgebungstemperatur			
bei Luftkühlung	°C		5 - 40
bei Wasserkühlung	°C		5 - 50
Leistungsaufnahme der Heizung	W		100
Gewicht	kg		11,4
Zulässiges Magnetfeld	mT		3
Transport- und Lagertemperatur	°C		-25 °C bis +55 °C
Relative Luftfeuchte	%		5-85 nicht betauend

1) Abstand von der Pumpe 1 m.

2) Gemessen mit 20% He-Konzentration, 10 s Messzeit.

3) Bis Frequenzabfall; höhere Durchsätze bei verringerter Drehzahl.

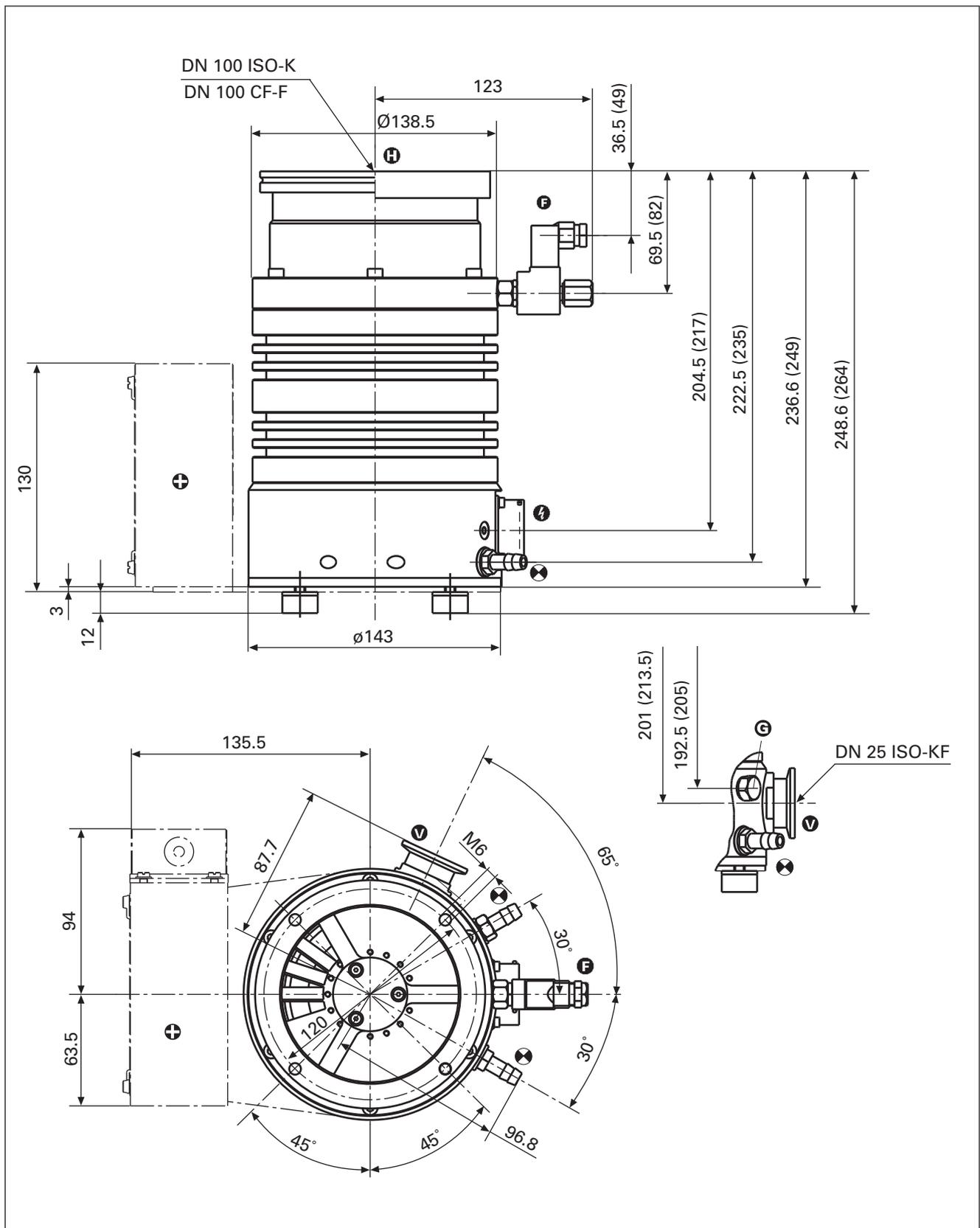
4) Die Drehzahl der Pumpe kann unter die Nennzahl abfallen.

4) Kennlinie Gasarten siehe unter Kap. 4.6.

5) Enddruck ist nach DIN 28 428 der Druck, der in einem Messdom 48 Stunden nach dem Ausheizen erreicht wird.

6) Bei maximalem Gasdurchsatz.

## 8.1. Maßbild



Werte in Klammern gelten für TMU 200M (DN 100 CF-F).



## MODEL 15 m<sup>3</sup>/h (9 cfm)



### OVERVIEW :

Our model 15 m<sup>3</sup>/h (9 cfm) is a scroll vacuum pump which is, like our other models, perfectly clean. Because of the simplicity of the design, low rotational speed, elimination of rubbing contact in the pump mechanism, and construction with corrosion-resistant materials, this pump is very reliable (30,000 hours of maintenance-free operation is typical in even the most severe applications). It is usually connected to a metal or elastomer diaphragm backing pump and then form a monobloc set which is easily transportable.

### OPERATING PRINCIPAL :

The pumping device is made up of 2 overlaped scrolls ; one of them is moving and the other one is fixed. The movement is provided by 3 cranks-hafts (one is driving) with the same eccentricity. This movement causes the formation of chambers between the two spiral vanes. Once these chambers are formed, they remain closed, and as a result of the movement of one vane are progressively, continuously reduced in size and displaced towards a central exhaust port.

### APPLICATIONS :

Our vacuum pumps are used all over the world to extract or circulate all kind of gases which can be aggressive, inert, toxic or radioactive (the only materials exposed to the vacuum environment are 316L and 420 stainless steel). Our model 15 m<sup>3</sup>/h is an ideal, dry, totally contamination-free roughing pump for applications such as evaporation, sputtering, scanning electron microscopes, tube evacuation and backfill stations. The pump has an ultimate vacuum capability of  $5.10^{-3}$  mbar (with diaphragm backing pump) and, therefore, can serve as a roughing pump for systems using cryo, ion or turbomolecular pumps.

### BENEFITS :

- Completely clean, dry and fluid tight vacuum pump
- Safety, reliability
- Low running and maintenance cost (no liquid nitrogen, no oil, long working life)
- Low noise and vibration level
- Air cooling (built-in fan)

### ACCESSORIES :

- Fine inlet and outlet metal filter
- Transport trolley

## TECHNICAL DATA :

Displacement :

¥ 50 Hz operation

¥ 60 Hz operation

Peak pumping speed (50 Hz operation) :

Ultimate vacuum (with backing pump) :

Connections :

Motor power

Enclosure rating

Motor voltage :

¥ 3-phase 50 Hz

¥ 3-phase 60 Hz

Other voltage

Weight

Noise

Leak tightness (helium)

15 m<sup>3</sup>/h (8.8 ft<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>)

18 m<sup>3</sup>/h (10.6 ft<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>)

12 m<sup>3</sup>/h (7.1 ft<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>)

5.10<sup>-3</sup> mbar

Meeting your need

0.37 kW

IP 55

230-400 V

240-480 V

On application

67 kg (148 lb)

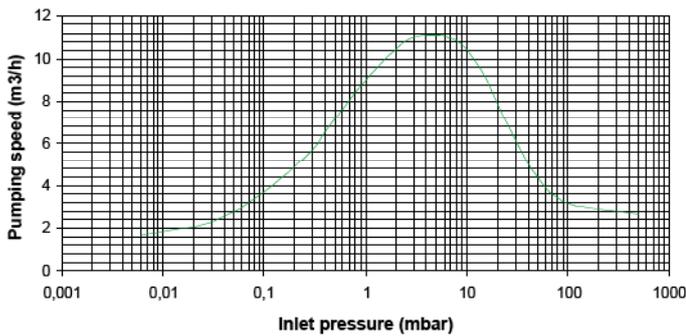
51,5 dB(A)

< 10<sup>-8</sup> mbar.l.s<sup>-1</sup>

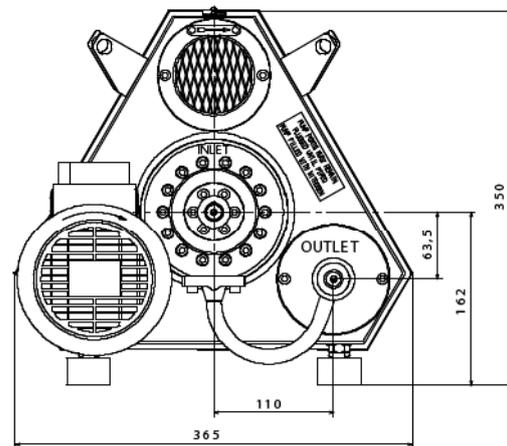
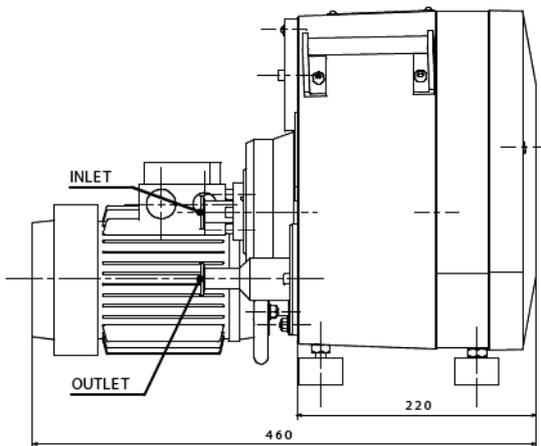
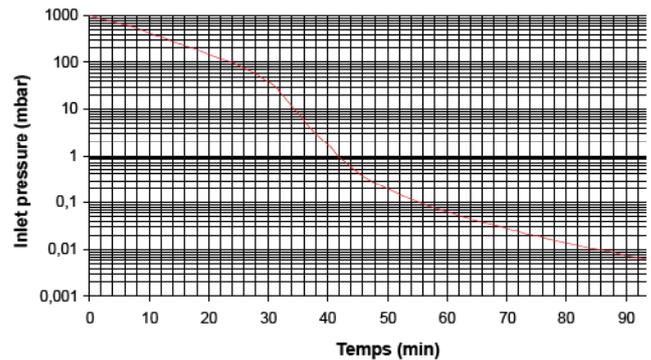
## PERFORMANCES :

For the tests, the pump was connected to an elastomer diaphragm backing pump (Pumping rated speed : 22 NI/min - 0.78 ft<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> - and ultimate vacuum : 2 mbar abs)

Pumping speed characteristic for the model 15 m<sup>3</sup>/h with diaphragm pump (air)



Pressure decrease in a 500 litres air vessel



Authorized US Distributor:

Covenant Distributors, Inc  
 1227 Augusta West Pkwy  
 Augusta, Georgia 30909  
 1-706-854-8444

World Wide Web: <http://www.eCovenant.net>



## INSTALLATION, OPERATING, AND MAINTENANCE INSTRUCTIONS

Model MB-60I Double Containment Compressor with Inverter  
Assembly #47236

### 1.0 Description

- 1.1 Designed to solve unique containment problems where radioactive gases are involved or where loss of gas could be hazardous or costly, Metal Bellows Double Containment Bellows Compressors utilize a secondary bellows as a leak-tight seal. In addition to the conventional inlet-outlet construction of typical compressors, there is a third port that is connected to a leakage detection switch which monitors the integrity of the pumping system. The sensor switch will open should any leakage of either the pumping or secondary bellows take place or the circuit is interrupted.
- 1.2 The basic concept of the Met Bel flexible bellows pump provides the characteristics that make it ideal for many high technology applications.
- 1.3 There are no wearing surfaces. Both the bellows and the reed valves simply flex. The result is a pumping mechanism that requires minimum maintenance. The drivers (Item 3) and motor (Item 1) have prelubricated sealed ball bearings.

### 2.0 Installation

- 2.1 The pump and motor are integrally connected, and are customer-wired to the inverter. See SFMBD drawing 47236 for dimensions.
- 2.2 Provide a firm level foundation. To obtain true alignment and reliable operation, the pump should be mounted on a concrete foundation or equivalent suitable base.
- 2.3 For port locations, see drawing 47236. When viewed from the front (opposite motor) the inlet is to the front right and the outlet is to rear left. Connect system piping to the 1/2 inch Cajon fittings at the inlet and outlet. When connecting be careful to prevent entry of chips or other foreign material into the pump.
- 2.4 The bellows is designed for 40 psig maximum operating pressure. To protect the system, a safety valve should be installed in the discharge line. Set the safety valve to limit the system pressure to 45 psig or less. Note - no valve of any type should be installed between the pump discharge and the safety valve. Locate a manual shut-off valve after (down-stream from) the safety valve and a manual shut-off valve in the inlet line to permit isolation of the pump for service or inspection.

- 2.5 The leakage detection switch (Item 8) is connected in the normally closed mode. This allows either leakage detection or any break in the sensor circuit to be brought to the operator's attention. The switch is rated as follows:

UL listing 5 AMPS, 250 VAC, 28 VDC  
5 AMPS RESISTIVE, 3 AMP INDUCTIVE AT SEA LEVEL

Lead connections are as follows:

RED & BLACK - SWITCH (POWER & COMMON)  
WHITE - GROUND

Refer to Figure 2, A-41199 Alarm S/A for additional details.

### 3.0 Operation

- 3.1 The compressor assembly has been designed and is capable of running under any combination of inlet and outlet pressure listed on drawing 47236.
- 3.2 Before initial start-up check supply voltage, wiring and piping for proper connections.
- 3.3 Open discharge and inlet manual shut-off (isolation) valves, if installed, before starting compressor.
- 3.4 Supply the pump with clean fluid (no particles) for maximum performance and minimum maintenance.
- 3.5 The pump is designed to operate with dry or saturated gas. The compressor is not designed to pump liquids. Ingestion of water or other liquids can seriously damage the compressor bellows and valve assemblies.
- 3.6 During normal operation, if there is a noticeable drop in capacity check to be certain that shut-off valves are not closed or partially closed and that filters in the system are not obstructed. If the valves are open, filters clear, and inlet fluid available it is possible that the compressor valves are not functioning properly.
- 3.7 To check or replace the compressor valve assemblies isolate the compressor from the system and power source. Remove the valve assemblies (Item 6) as described in paragraph 5.1. Inspect, clean, repair or replace valves as required.

### 4.0 Maintenance

- 4.1 The compressor has been designed for minimum maintenance. There are no wearing surfaces - the bellows and reed valves simply flex. Normal maintenance consists of checking the compressor for operation and periodic listening for excessive noise or looking for grease flow from the ball bearings.

The motor (Item 1), and drivers (Item 3) have prelubricated sealed ball bearings which require no lubrication. Periodic inspection for excessive noise or grease flow every 2000 hours of operation or every 6 months is recommended.

#### 5.0 Parts Replacement - Removal and Assembly

**CAUTION - Disconnect motor from electrical power and close inlet and outlet manual shut-off valves before working on the compressor assembly.**

##### 5.1 Remove Valve Assembly (Item 6).

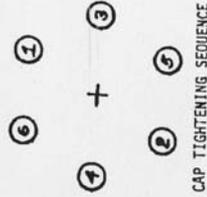
1. Loosen two 1/2 inch Cajon nuts and remove series plumbing to allow removal of cap subassembly for individual compressor head. Save gaskets for reuse. Remove six 8-32 socket head cap screws (Item 13) and six #8 lock washers (Item 14). Support the valve assembly when removing the last of the cap screws to avoid dropping the valve assembly (Item 6).
2. Lift the cap subassembly (Item 5) and then remove the valve assembly from between the cap (Item 5) and bellows sealed assembly (Item 4).
3. The aluminum O-rings (Items 15, 16 and 17) removed with the valve assembly should be discarded. Always use new O-rings.
4. After valve removal immerse valve assembly in a suitable solvent such as chloroethane or alcohol. Use a soft brush to clean between reed valve and valve seat. Never use wire brushes or sharp edged tools to clean the valve seats or reeds.  
  
Do not bend valve reed more than 1/4 inch from the valve plate when inspecting or cleaning. The valve reed should fit tightly against the valve plate after cleaning or inspecting.
5. Inspect the valve seat and reed for damage, pitting, or corrosion. Replace the valve assembly if any defects are discovered.

##### 5.2 Replace Valve Assembly (Item 6)

1. Install large O-ring (Item 15) in groove in cap. Use a drop of assembly adhesive, Eastman 910 or similar adhesive to retain the O-ring during subsequent assembly operations.
2. Install two .032 X 3.025 ID aluminum O-rings (Item 16) in valve plate. Retain with a drop of assembly adhesive.
3. Install two .030 X .690 ID aluminum O-rings (Item 18) in valve plate. Retain with a drop of assembly adhesive.

rings. The O-ring should be free of any kinks or sharp bends.

5. Locate inlet valve reed rivet extension pin and install valve assembly as shown in Fig. 1 with the projecting pin seated in the locating hole in the bellows valve terminal. The valve assembly must be installed as shown in Fig. 1.
6. Replace cap on compressor and secure with six 8-32 socket head cap screws (Item 13) and six #8 lock washers (Item 14). Tighten screws finger tight then gradually increase torque on each screw progressing in a clockwise direction. Tighten in the sequence shown starting at 1 and progressing to 6. Final torque should be 70-75 inch pounds. Replace Cajon gaskets and tighten 1/2 inch Cajon nuts at the cap subassemblies (Item 5) for the series plumbing. Run the pump for at least 1 hour and retorqued the socket head cap screws to the final value of 70-75 inch pounds and recheck Cajon nuts for tightness.



##### 5.3 Replace Bellows Sealed Assembly (Item 4).

1. Disconnect leakage detection switch by removing three #4-40 X 1/4 hex head screws from switch housing. Remove valve assembly (Item 6) as described in Paragraph 5.1.
2. Remove four #6-32 X 5/8 hex head screws (Item 18) and lift off cover (Item 7).
3. Remove two #10-32 X 5/8 socket head cap screws (Item 19) and two #10 lock washers (Item 20) which attach driver sub assembly (Item 3) to the bellows center terminal of the sealed assembly (Item 4).
4. Remove four 1/4-20 X 3/4 socket head cap screws (Item 25) and four 1/4 lockwashers (Item 24). Support outer sleeve when removing the last of the socket head cap screws. The bellows sealed assembly (Item 4) can now be removed for inspection and/or replacement.

5. Install sealed assembly (Item 4) on mount (Item 2) and driver subassembly (Item 3). Check to see that bellows center terminal is seated in the counterbore in the driver. Check also for alignment of the sealed assembly. See drawing 47236 for proper orientation of the sealed assembly.
6. Replace the four 1/4-20 X 3/4 socket head cap screws (Item 25) and lockwashers (Item 24) which secure the sealed assembly (Item 4) to the mount (Item 2). Tighten the cap screws finger-tight.
7. Replace the two #10-32 X 5/8 socket head cap screws (Item 19) and two #10 lockwashers (Item 20) which attach driver sub assembly (Item 3) to the bellows center terminal. Loosen the four 1/4-20 X 3/4 socket head cap screws (Item 25) and rotate outer sleeve as required to locate threads in bellows center terminal. Then tighten the two #10-32 X 5/8 socket head cap screws to a final torque of 40-45 inch pounds.
8. Tighten the four 1/4-20 X 3/4 socket head cap screws (Item 25) which secure the sealed assembly to the mount. Gradually tighten these screws. Tighten to a final torque of 70-80 inch pounds.

**NOTE -** When installing bellows assembly and/or socket head cap screws which attach driver to bellows center terminal or bellows outer sleeve sealed assembly to mount, it is important to check alignment of components to prevent torque on the bellows resulting from misalignment between driver and bellows sealed assembly when tightening the two #10-32 X 5/8 socket head cap screws (Item 19) which attach the driver to the bellows center terminal. Do not torque against the bellows - hold or otherwise restrain the drivers (Item 3) when tightening cap screws (Item 19).

Install valve assembly (Item 6) and secure cap as described in Paragraph 5.2.

9. Slide detector switch housing onto sensor bellows. Replace three #4-40 X 1/4 hex head screws loosely. Adjust switch towards bellows until switch opens, back off just enough to close switch, then tighten three screws in housing. Recheck continuity of switch. Refer to Fig. 2 for details.

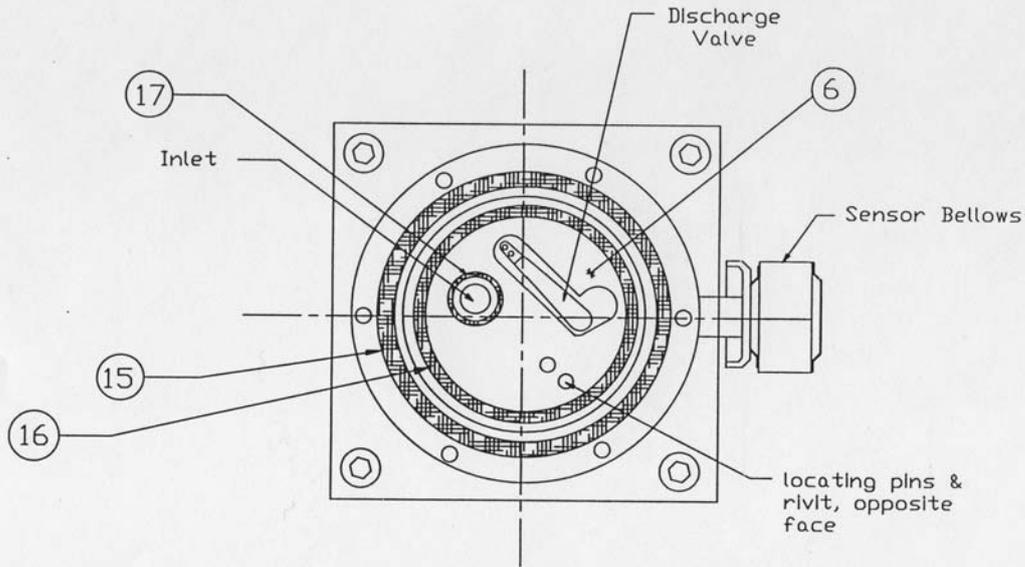
#### 5.4 Replace Driver Subassembly (Item 3).

1. Remove sealed subassembly as per 5.3.1 through 5.3.4.
2. The driver subassemblies are Loctited to compressor shaft. With propane torch heat face of driver cam and loosen set screw in cam. Slide outer driver subassembly (Item 3) and, if required, inner driver subassembly off shaft.

3. Clean Loctite off shaft and keyway with Loctite Primer N. Reassemble new driver subassemblies by sliding on shaft and key. Drivers should slide freely on shaft. Remove and repeat cleaning if required.
4. Replace sealed subassemblies (Item 4) as per Sections 5.3.5 through 5.3.8. Attach driver subassemblies to bellows center terminals with four #10-32 X 5/8" socket head cap screws and lock washers (Items 19 & 20) making sure all mating counterbores are fitted properly.
5. Turn pump over by hand several times to assure proper assembly. Remove set screws from driver subassembly cams and squirt several drops of Loctite 635 into cam. Replace set screws and tighten. Allow 12 hours minimum for Loctite to cure prior to running compressor. Replace valve assembly and cap as per Section 5.2. Replace cover (Item 7) with four #6-32 X 5/8 hex head screws (Item 18).

#### 5.5 Replacing Motor (Item 1)

1. Disconnect motor from inverter/electrical power and close isolation valves if required. Remove four #6-32 socket cap screws (Item 18) and remove cover (Item 7).
2. Remove driver subassemblies as per Section 5.4.1 through 5.4.2.
3. Remove four 3/8 X 1 socket cap screws (Item 9) and 3/8 lockwashers (Item 10) and remove housing from motor "C"-face.
4. Slide housing (Item 2) onto "C"-face of new motor and replace four 3/8 X 1 socket cap screws and 3/8 lockwashers (Items 9 & 10). Level housing and tighten screws.
5. Replace driver subassemblies as per Sections 5.4.3 through 5.4.5. Reconnect inverter/electrical power to pump per nameplate on motor.



Required Installation of Valve Plate  
 "As Shown"  
 Side View Figure 1

Manual 47236  
 Page 7 of 9  
 Rev. N/R

Dwg by: H.D. Vax  
 09/97

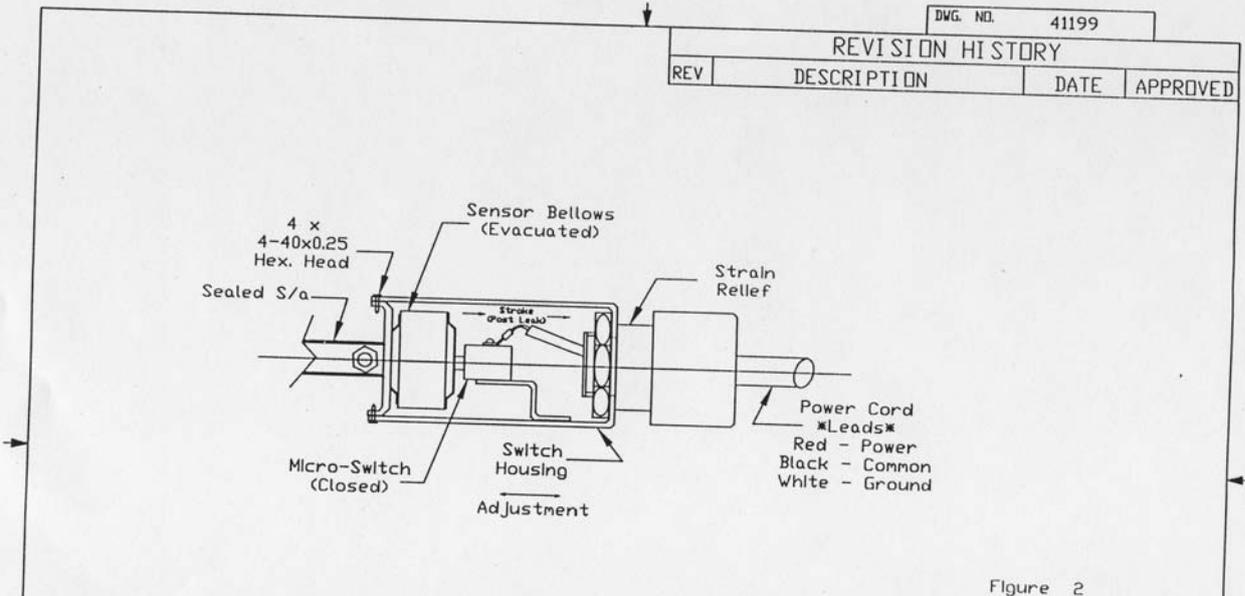


Figure 2

REQD	REQD	REQD	REQD	CAGE CODE NO.	DWG SIZE	PART NO.	DESCRIPTION	MATERIAL	SPECIFICATION	IT.	
CUST. DWG. NO.											
PARTS LIST											
DO NOT USE SULFUR BASE CUTTING OILS, ETC. TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DECIMALS .XXX = ± .005 ANGLES ± 1° .XX = ± .010 .X = ± .02 ALL DIMENSIONS ARE IN INCHES MACHINED SURFACES AND DIAMETERS BURR FREE PER ES-1018-S FILLET RADII .010 - .020 BREAK CORNERS .005 - .010 INTERPRET DRAWING PER ASME Y14.5M 1994 DRILLED HOLE TOLERANCES PER ANSI Q387 THREADS PER FEDERAL STANDARD H28											
DRAWN		RLS		06/27/92		CHK.		PLD		06/27/92	
ENG.		PLD		06/27/92		MFG.					
D. A.						MATL. SPEC.					
FINISH SPEC.											
NEXT ASSY		JOB REF									

REVISION HISTORY			
REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED

SENIOR FLEXONICS INC.  
 METAL BELLOWS DIVISION  
 1075 PROVIDENCE HIGHWAY  
 SHARON, MA 02067

**ALARM S/A**

SIZE A CAGE CODE 07649 DWG. NO. 41199 REV  
 SCALE 1:1 SHEET 1 OF 1

Manual 47236  
 Page 8 of 9  
 Rev. N/R



SPARE PARTS LIST

MBC ASSY NO. 47236 REV. -- B/M NO. 1  
 CUST ASSY NO. --- REV. ---  
 B/M BY: HDW DATE 9/23/97  
 CHKD BY: --- DATE ---

ITEM NO.	PART NO.	REV.	PART NAME	QTY./ ASSY.	RAW MAT'L.
3	40475		DRIVER S/A	2	
4	41111-1		SEALED S/A L.P.	2	
6	40755		VALVE ASSY	2	
16	A-40143		O-RING, ALUMINUM	4	3.025 I.D.
15	A-40149		O-RING, ALUMINUM	2	3.500 I.D.
17	30239		O-RING, ALUMINUM	4	.690 I.D.
1	47236-100		MOTOR (3/4 HP) INVERTER DUTY	1	
31	47236-102		INVERTER - 15H SERIES	1	

B/M NO.	ECN	DATE

FORM NO. SPL-1. 997

1	A	47236-102	15H-INVERTER	31
---	---	-----------	--------------	----

THIS ITEM TO BE PACKAGED AND SHIPPED WITH PUMP

RECD	FSC# NO.	DWG SIZE	PART NO.	DESCRIPTION	MATERIAL	QMG. NO.	REV
2			30283	CAPLUG			30
1	A		25684	I.D. PLATE	ALUM		29
1	A		47236-101	NMEPLATE, SPECIAL	S.S.		28
2			30196	SELF TAP SCR	6-32 X 1/4		27
2	A		44515-1	BUTT WELD GLAND			26
8			30285	CAP SCR	.25-20 X .75		25
8			30124	LOCKWASHER	.25		24
2	A		40484	MALE NUT			23
4	A		38844-8	GASKET RET. ASSY			22
6			30273	HEX SCR	4-40 X .25		21
4			30149	LOCKWASHER	#10		20
4			30138	CAP SCR	10-32 X .62		19
4			30338	SCREW	6-32 X .62		18
4	A		30239	O-RING	ALUM	.690 I.D.	17
4	A		40143	O-RING	ALUM	3.025 I.D.	16
2	A		40149	O-RING	ALUM	3.500 I.D.	15
12			30157	LOCKWASHER	#8		14
12			30172	CAP SCR	8-32 X .75		13
1	A		29819-1	KEY			12
1	B		42228-2	TUBE S/A			11
4			30104	LOCKWASHER	.375		10
4			30195	CAP SCR	.375-16 X .88		9
2	C		41000	SWITCH/CABLE S/A			8
1	B		44680	COVER-MOD			7
2	B		40755	VALVE ASSY			6
2	B		42214-2	CAP S/A			5
2	B		41111-1	SEALED S/A L.P.			4
2	B		40475	DRIVER S/A			3
1	D		40988	HOUSING MACH.			2
1	C		47236-100	MOTOR			1

SIZE	FSC# NO.	QMG. NO.	REV
B	07649		47236
SCALE			SHEET 2 OF 2

Im TLK findet die Version MB-601DC Anwendung. Dabei handelt es sich um eine "double containment" Version der MB-601. Andere tech. Daten sind identisch.

## MB-601

## SPECIFICATIONS

### General

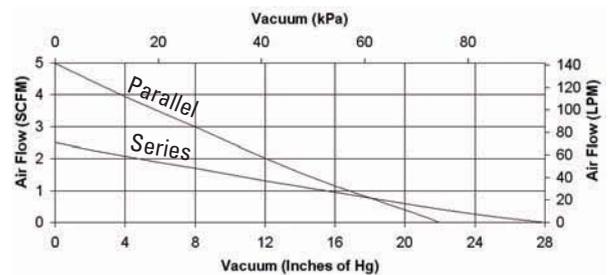
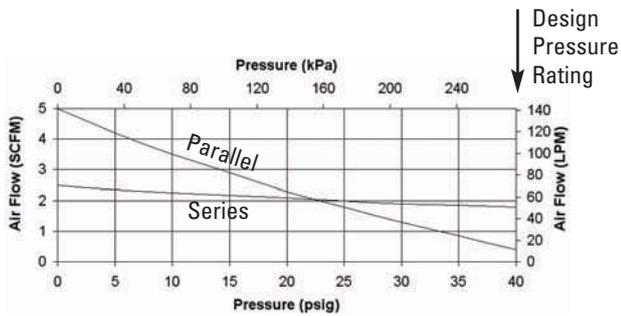
Housing Body	Cast Aluminum
Bellows	AM-350 Stainless Steel
All other wetted surfaces	300 Series Stainless Steel except for Valve Assembly Teflon Valve Gaskets and Viton O-Rings
Bearings	Permanently Lubricated Ball Type
Weight	48 lbs.
Port Connections	3/8 N.P.T.

### Electrical

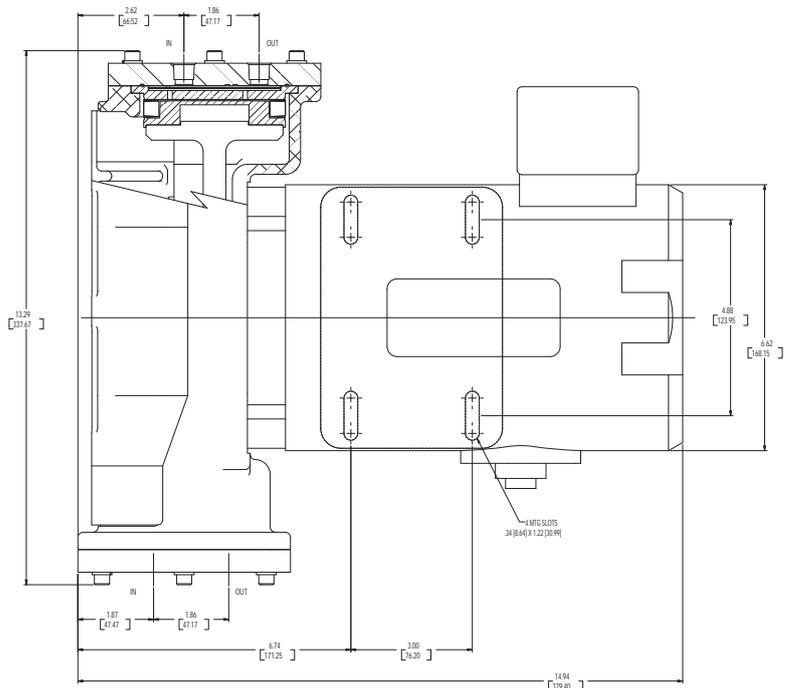
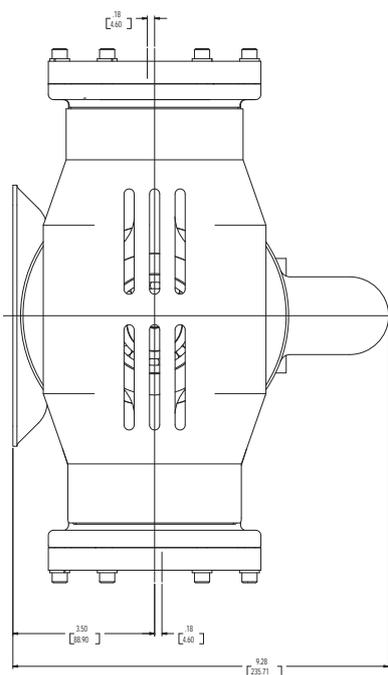
Standard	115/230V 50/60 Hz.
Current at 115V/60 Hz	6.6 Amps (max)
Motor Specification	3/4 H.P. Single Phase ODP - Open Drip Proof Motor
Operating Speed @ 60 Hz.	1725 R.P.M.
Insulation	Class B



**Optional Features:** Explosion Proof Motor, Polyphase Motor, Totally Enclosed Fan Cooled (TEFC) Motor, Variable Speed Motor, VCR Fittings, Viton Valve Gaskets, Aluminum O-Ring Seals, High Pressure Models (See Page 15)



Flows depicted are at 60Hz. Flows at 50 Hz are 5/6 of 60 Hz flows.





---

# Literaturverzeichnis

- [Abd02] Measurement of the Solar Neutrino Capture Rate by the Russian American Gallium Solar Neutrino Experiment During One Half of the 22-Year Cycle of Solar Activity, *J.Exp.Theor.Phys.*95:181-193,2002; *Zh.Eksp.Teor.Fiz.*122:211-226,2002
- [Alt03] C. Weinheimer, Laboratory Limits on Neutrino Masses, in G. Altarelli and K. Winter, *Neutrino Mass*, Springer 2003 (Eds.)
- [Alt05] Complete results for five years of GNO solar neutrino observations, *Phys.Lett.B*616:174-190,2005
- [Ara04] T. Araki et al. Measurement of Neutrino Oscillation with KamLAND: Evidence of Spectral Distortion
- [Arm06] A large, 64-pixel PIN-diode detector for low-energy beta-electrons, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 568 (2006) 382-387
- [Bah03] J. Bahcall, Solar Models: An historical overview, *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)* 118 (2003) 77-86
- [Bah04] J. Bahcall, Solar models and solar neutrino oscillations, *New Journal of Physics* 6 (2004) 63
- [Bar98] R. Barate et. al., *Eur. Phys. J C*2 (1998) 395
- [Ber06] C. Berger, *Elementarteilchenphysik : von den Grundlagen zu den modernen Experimenten*, Springer, 2006
- [Ber06] L. Bergström, *Cosmology and particle astrophysics / Lars Bergström*, Springer 2006
- [Bes02] Dissertation U. Besserer, Tritiumspeicherung in ZrCo, 2002
- [Bon99] J. Bonn et al., *Nucl. Instr. and Meth. A*421 (1999) 256
- [Bor06] L. Bornschein, Measurements with the KATRIN pre-spectrometer, *Progress in Particle and Nuclear Physics* 57 (2006) 49–57
- [Cle95] B.T. Cleveland et al., Update on the measurement of the solar Neutrino flux with the Homestake Chlorine Detector, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 38 (1995) 47
- [Cre05] Patentschrift Léon Creux zur Spiraltaumelpumpe , 1905
- [Dav94] R. Davis, A Review of the Homestake Solar Neutrino Experiment, *Prog. Part. Nucl. Phys.* 32 (1994) 13
- [Dav96] R. Davis, A Review of Measurements of the Solar Neutrino Flux and their Variation *Prog. Part. Nucl. Phys.* 48 (1996) 284
- [DCH06] Double Chooz: A Search for the Neutrino Mixing Angle  $\theta_{13}$
- [Det06] Jürgen Detlefsen, Uwe Siart: *Grundlagen der Hochfrequenztechnik. 2. Auflage*, Oldenbourg Verlag, München Wien, 2006
- [Doe08] P. DOE, Status of the focal plane detector (FPD), presentation at the 15th KATRIN Collaboration Meeting, Karlsruhe, September 29-30 (2008)

- [Eic08] First tritium results of the KATRIN test experiment TRAP, Fusion Science and Technology Vol. 54 Aug. 2008
- [Fuk03] M. Fukugita, Physics of neutrinos and application to astrophysics, Springer 2003
- [GA103] G. Altarelli, Neutrino mass, Springer 2003
- [GAL99] GALLEX solar neutrino observations: results for GALLEX IV, Physics Letters B 447\_1999.127–133
- [Gro08] S. Grohmann, Cryogenic design of the KATRIN source cryostat, Advances in cryogenic engineering: Transactions of the cryogenic Engineering Conference – CEC, Vol. 53
- [Gru05] C.. Grupen, Astroparticle Physics Springer 2005
- [Han06] S. Hannsted, Neutrinos in cosmology, Progress in Particle and Nuclear Physics 57 (2006) 309-323
- [Hir89] K.S. Hirata et al., Phys. Rev. Lett. 63 (1989) 16
- [Hir89] K.S. HIRATA et al., Phys. Rev. Lett. 63 (1989) 16
- [Hom09] Homepage Homestake Chlorine Experiment
- [Hos06] J. Hosaka et al., Phys. Rev. D 73 (2006) 112001
- [Hos06] J. HOSKA et al., Phys. Rev. D 73 (2006) 112001
- [ICE01] IceCube Preliminary Design Document
- [Jou08] K. Jousten, Handbook of Vacuum Technology, Wiley-VCH, 2008
- [Kam08] Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND Physical Review Letters 100 (22): 221803
- [KAT04] KATRIN Design Report, 2004
- [KKG06] V. KLAPDOR-KLEINGROTHAUS and I. V. KRIVOSHEINA, THE EVIDENCE FOR THE OBSERVATION OF  $0 \rightarrow \nu\beta\beta$  DECAY: THE IDENTIFICATION OF  $\bar{\nu}\beta\beta$  EVENTS FROM THE FULL SPECTRA
- [Kra05] Ch. Kraus et al., Final results from phase II of the Mainz Neutrino Mass Search in Tritium beta Decay, Eur. Phys. J. C 40 (2005) 447-468
- [Kru83] Magnetic field paralleliser for  $2\pi$  electron spectrometer and electron-image magnifier, J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 16. 1983
- [Lob99] V.M. Lobashev, Direct search for mass of neutrino and anomaly in the tritium beta-spectra, Phys. Lett B 460 (1999), 227-235
- [Lou07] X. Lou, KATRIN NEG pumping concept investigation, Vacuum 81 (2007) 777–781
- [Mat03] M. Roos, Wiley 2003
- [MeB09] Datenblatt Senior Aerospace/Metall Bellows, OTS Pumps & Compressors
- [OPE09] The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam
- [Pap07] L. Papantonopoulos (Ed.)The invisible universe: Dark Matter and Dark Energy, Springer 2007
- [Pau30] W. Pauli, Brief an die Physikalische Gesellschaft in Tübingen vom 4. Dezember 1930, nachzulesen in L.M. Brown, Phys. Today 31 (1978), 23
- [PDG08] Particle Data Group, Particle Data Booklet, 2008
- [Pon57] B. Pontecorvo, J. Expetl. Theoret. 33 (1957) 549 and ibid. 34 (1958) 247

- [Rei59] F. Reimes & C.L. Cowan Phys. Rev. 113 (1959), 273
- [Sch09] M. Schlösser, Diplomarbeit
- [Sel04] U. Seljak, Phys. Rev. D71 (2005) 103515
- [Sha03] F. Sharipov, Numerical Calculation of Tritium flow trough the KATRINbeam line
- [Sha04] Calculation of Tritium flow between the buffer vessel up to first vacuum
- [Sky09] SDSS Homepage, <http://www.sdss.org>
- [SNO00] SNO COLLABORATION, Nucl. Inst. Meth. A 449 (2000) 172
- [SNO01] Measurement of the rate of  $\nu_e+d \rightarrow p+p+e^-$  interactions produced by  $^8\text{B}$  solar neutrinos at the Sudbury Neutrinos Observatory (2001), arXiv:nucl-ex/0106015v2
- [SNO02] The SNO Collaboration, Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory, Phys. Re. Lett. Volume 89, No. 1, 011301 (2002)
- [STB09] Sicherheitstechnische Beschreibung des KATRIN Inner Loop
- [Stu07] Diplomarbeit M. Sturm Bestimmung der Tritiumflussreduktion einer Tritium-Argon-Frostpumpe für das Neutrinomassenexperiment Katrin, 2007
- [Stu10] Doktorarbeit M. Sturm Aufbau und Inbetriebnahme des Inner Loop der Tritiumquelle von Katrin, in Arbeit, 2010
- [Tdf09] 2dFGRS Homepage, <http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/>
- [Thu07] Doktorarbeit T. Thümmeler, Präzisionsüberwachung und Kalibration der Hochspannung für das KATRIN-Experiment
- [TLK05] The closed tritium cycle of the Tritium Labratory Karlsruhe, Fusion Science and Technology, Vol. 48, July/Aug. 2005
- [Val06] K. Valerius, Electromagnetic design and inner electrode for the KATRIN main spectrometer, Progress in Particle and Nuclear Physics 57 (2006) 58-60
- [WiS09] Wikipediaartikel Scroll compressor, [http://en.wikipedia.org/wiki/Scroll\\_compressor](http://en.wikipedia.org/wiki/Scroll_compressor)

## Danksagung

Hiermit möchte ich allen Dank sagen, die mich bei der Durchführung dieser Arbeit unterstützt und zum Gelingen beigetragen haben, insbesondere Prof. Dr. Guido Drexlin, der mir die Durchführung dieser Arbeit ermöglichte.

Prof. Dr. Müller möchte ich für die Übernahme der Zweitkorrektur danken.

Dr. Beate Bornschein und Michael Sturm danke ich für die engagierte Vorortbetreuung am TLK und das gewissenhafte Korrekturlesen dieser Arbeit.

Ebenso danke ich allen im Tritiumlabors Karlsruhe für das angenehme Arbeitsklima und die Unterstützung. Sehr hilfsbereit waren Hans-Dieter Adami, Dr. Uwe Besserer, Erhan Cilbir, Dr. Ion Cristescu, Dr. David Demange, Helmut Dittrich, Eleonore Fanghänel, Sebastian Fischer, Manfred Göckel, Beate Kloppe, Frank Kramer, Sylvia Krieger, Long Thanh Le, Christin Melzer, Eva Porter, Frank Rehlinghaus, Peter Schäfer, Magnus Schlösser, Peter Schuster, Karl-Heinz Simon, Monika Sirch, Robert Wagner, Stefan Welte, Dr. Jürgen Wendel und Werner Wurster.

Des Weiteren danke ich Philipp Tuchscherer und Harry Stober von MHC für die kompetente Produktion der Verrohrung.

Ebenso danke ich der IK-Werkstatt um Siegfried Horn. Egal ob es kurzfristig galt Teile anzufertigen oder um technischen Rat ging, ich wurde stets freundlich behandelt und schnell mit allem nötigen versorgt.

Desweiteren gilt mein Dank allen im IK die den Aufbau eines Experiments in wie KATRIN erst ermöglichen und zu einem allgemein sehr angenehmen Arbeitsklima beitragen.

## **Nachwort**

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Florian Priester, Karlsruhe Dezember 2009

