

# Entwicklung eines Gassystems zur Ansteuerung, Überwachung und Qualitätskontrolle eines ALICE TRD Supermodules

als Diplomarbeit vorgelegt von  
Helge Grimm

Westfälische Wilhelms Universität Münster  
Institut für Kernphysik  
2009



*„We shall not cease from exploration  
And the end of all our exploring  
Will be to arrive where we started  
And know the place for the first time.“*

T.S. Eliot



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1 Das Standardmodell . . . . .	3
1.2 Das Quark-Gluon-Plasma . . . . .	4
1.3 Gliederung . . . . .	6
<b>2 Large Hadron Collider</b>	<b>7</b>
2.1 Aufbau . . . . .	7
2.2 Die Experimente des LHC . . . . .	9
2.2.1 ATLAS . . . . .	9
2.2.2 Compact Muon Solenoid (CMS) . . . . .	9
2.2.3 Large Hadron Collider beauty (LHCb) . . . . .	9
2.2.4 Large Hadron Collider forward (LHCf) . . . . .	10
2.2.5 TOTal Elastic and diffractive cross section Measurement(TOTEM) . . . . .	10
<b>3 ALICE</b>	<b>11</b>
3.1 Die Subdetektoren . . . . .	12
3.1.1 Inner Tracking System (ITS) . . . . .	12
3.1.2 Time Projection Chamber (TPC) . . . . .	12
3.1.3 Transition Radiation Detector (TRD) . . . . .	12
3.1.4 Time-of-Flight (TOF) . . . . .	12
3.1.5 High Momentum Particle Identification (HMPID) . . . . .	13
3.1.6 ElectroMagnetic CALorimeter (EMCAL) . . . . .	13
3.1.7 Photon Spectrometer (PHOS) . . . . .	13
3.1.8 Muon Spectrometer . . . . .	13
<b>4 ALICE TRD</b>	<b>14</b>
4.1 Aufbau . . . . .	14
4.2 Funktion . . . . .	15
4.3 Gas . . . . .	18
4.3.1 Detektorgas . . . . .	18
4.3.2 Driftgeschwindigkeit und Diffusion . . . . .	19
4.3.3 Elektronenanhang durch Gasverunreinigungen . . . . .	19
4.3.4 CERN Gassystem . . . . .	21
4.3.5 Situation in Münster . . . . .	24

<b>5 Gassystem</b>	<b>25</b>
5.1 Zielsetzung . . . . .	25
5.2 Hardware . . . . .	25
5.2.1 Massenflussregler . . . . .	26
5.2.2 Pressluftventile MFC . . . . .	27
5.2.3 Massenspektrometer . . . . .	28
5.2.4 Orbisphere 510 . . . . .	33
5.2.5 Drucksensoren . . . . .	33
5.2.6 Messwerterfassung . . . . .	36
5.3 Software . . . . .	37
5.3.1 Distributed Information Management (DIM) . . . . .	37
5.3.2 orb510-dimsrv und orb510-logger . . . . .	38
5.3.3 mgc647c-dimsrv . . . . .	38
5.3.4 orb510-viewer . . . . .	39
5.3.5 smsalerter . . . . .	40
5.3.6 adcserver . . . . .	41
5.3.7 vreg . . . . .	41
5.4 Betrieb . . . . .	41
<b>6 Gastests</b>	<b>44</b>
6.1 Problematik . . . . .	44
6.2 Bestimmung der Gasdichtheit . . . . .	47
6.3 Durchführung . . . . .	49
6.4 Ergebnisse . . . . .	56
6.5 Interpretation . . . . .	57
<b>7 Zusammenfassung</b>	<b>65</b>
<b>8 Anhang</b>	<b>66</b>
8.1 Eichprotokolle der Massenflussregler . . . . .	67
8.2 Datenblätter der Drucksensoren . . . . .	75
8.3 Datenblatt des Massenspektrometers . . . . .	77
8.4 Interpretationsanleitung Massenspektrometer . . . . .	78
8.5 Datenblatt des Orbisphere 510 Sensors . . . . .	80
Literatur . . . . .	81

# 1 Einleitung

Schon immer lag es im Interesse der Menschen, Gegenstände und ihre Zusammensetzung genauer zu studieren und zu erforschen. Während man sich zuerst noch auf optische Werkzeuge wie Lupen und Mikroskope beschränken musste, gab es mit dem technischen Fortschritt immer mehr Möglichkeiten in der Chemie und Physik.

In der Antike bei den Griechen gab es die Idee eines unteilbaren Teilchens - dem Atom - aus dem alle Materie aufgebaut sein sollte (Demokrit, ca. 400 vor Christus).

Es brauchte einige Jahrhunderte, bis zu Beginn des 19. Jahrhunderts dieser Gedanke von dem englischen Chemiker John Dalton wieder in den Blickpunkt gerückt wurde. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurden dann von Thomson die Elektronen entdeckt, allerdings nicht im Bewusstsein, dass diese ein Bestandteil der Atome sind oder sein könnten. Dies geschah erst Anfang des 20. Jahrhunderts, als Ernest Rutherford seine Überlegungen zu einem Atommodell auch experimentell überprüfte. So wurde erkannt, dass ein Atom einen Kern besitzt und dieser Kern zudem positiv geladen ist. Die Hülle um diesen Kern herum besteht aus Elektronen und ist negativ geladen. Ein paar Jahre später entwickelte Niels Bohr für die Atomhülle ein Schalenmodell, welches die vielen chemischen und physikalischen Eigenschaften der Elemente erklärt. 1932 gelang dann James Chadwick der Nachweis des Neutrons. Damit waren die Bestandteile des Kerns (Nukleonen) bekannt und das Atommodell für die damalige Zeit erst einmal vollständig.

Nach dem zweiten Weltkrieg rückte die Erforschung der Elementarteilchen in den Fokus. Durch Teilchenbeschleuniger oder kosmische Höhenstrahlung in Blasenkammern erzeugte Teilchenspuren wurden vermessen und die Lebensdauer von zerfallenden Teilchen sowie das Verhältnis Masse zu Ladung bestimmt. Dadurch ergab sich ein Überblick auf die Substruktur der bisher bekannten Teilchen.

## 1.1 Das Standardmodell

In Folge der bisherigen Forschung sind nun im Standardmodell der Elementarteilchenphysik die Austauschteilchen der drei grundlegenden Wechselwirkungen (Vektorbosonen oder auch Eichbosonen genannt) und die 12 Elementarteilchen, die sogenannten Quarks und Leptonen, vereint. Diese werden anhand ihrer zunehmenden Masse in drei Generationen unterteilt.

Alle Elementarteilchen mit einer Ladung unterliegen der elektromagnetischen Wechselwirkung, die schnell mit anwachsendem Abstand abnimmt. Die starke Wechselwirkung

Ladung Q	Quarks		Leptonen	
	$\frac{2}{3}$ e	$-\frac{1}{2}$ e	-1 e	0 e
1. Generation	Up $u$	Down $d$	Elektron $e$	Elektron-Neutrino $\nu_e$
2. Generation	Charm $c$	Strange $s$	Myon $\mu$	Myon-Neutrino $\nu_\mu$
3. Generation	Top $t$	Bottom $b$	Tau $\tau$	Tau-Neutrino $\nu_\tau$

Abbildung 1.1: Übersicht über die 12 Elementarteilchen im Standardmodell

hingegen tritt nur bei den Quarks auf, deren Stärke jedoch nimmt mit zunehmenden Abstand zu (wie bei einem Gummiband, das auseinander gezogen wird). Die schwache Wechselwirkung beeinflusst alle Elementarteilchen. Die Gravitation, die ausnahmslos auf alle Elementarteilchen wirkt, ist nicht im Standardmodell enthalten. Das dazugehörige Wechselwirkungsteilchen, das Graviton, ist bisher experimentell nicht nachgewiesen.

Wechselwirkung	koppelt an	Austauschteilchen	Stärke (relativ)	Reichweite (m)
starke W.	Farbladung	Gluonen (g)	1	$\approx 10^{-15}$
elektromagn. W.	el. Ladung	Photonen ( $\gamma$ )	1/137	$\infty$
schwache W.	schw. Ladung	$W^{\pm}$ -, $Z^0$ -Bosonen	$10^{-5}$	$\approx 10^{-18}$
Gravitation	Masse	Gravitonen?	$10^{-39}$	$\infty$

Abbildung 1.2: Die aktuell bekannten Wechselwirkungen mit ihren Austauschteilchen [1, frei nach Tab. 7.11] [2]

Der starken Wechselwirkung liegt die Quantenchromodynamik (QCD) zugrunde. In dieser Theorie bekommt jedes Quark zusätzlich zur elektrischen Ladung noch eine Farbladung zugewiesen. Diese setzt sich aus den drei Farben rot, grün und blau sowie ihren Antifarben anti-rot, anti-grün und anti-blau zusammen.

Da die starke Wechselwirkung umso stärker wird, je weiter zwei Farbladungen voneinander entfernt werden, ist es nicht möglich, Quarks voneinander zu trennen. Sie verbinden sich immer zu farbneutralen Teilchen. Es gibt zwei bisher beobachtete verschiedene Kombinationen: Zum einen das aus drei Quarks bestehende Baryon und zum anderen das aus Quark und Antiquark gebildete Meson. Die Quarks des Baryons haben jeweils unterschiedliche Farbladungen, die sich zu weiß addieren. Beim Meson neutralisiert sich eine beliebige Farbladung mit ihrer Antifarbladung. Daher sind bei diesem sogenannten Confinement (Einsperrung) nur farbneutrale (weiße) Teilchen zu beobachten.

## 1.2 Das Quark-Gluon-Plasma

Um das Confinement aufzubrechen, benötigt man hohe Temperaturen und Drücke, wie sie zum Beispiel in Schwerionenkollisionen an Beschleunigern erzeugt werden oder

kurz nach dem Urknall geherrscht haben. Die hohe Energiedichte überwindet die starke Wechselwirkung und lässt die Quarks und Gluonen sich quasi-frei bewegen. Diesen Zustand nennt man Quark-Gluon-Plasma (QGP). Die durch den hohen Druck resultierende Expansion führt dann zu einem Abkühlen und dem sogenannten Ausfrieren (Freeze-Out) der quasi-freien Quarks zu neuen Hadronen. In Abbildung 1.3 ist dieser Phasenübergang dargestellt.

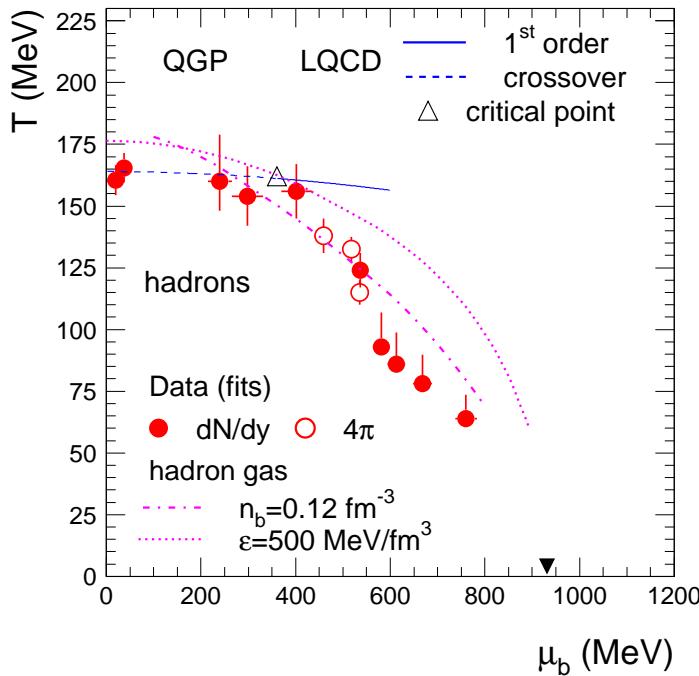


Abbildung 1.3: QGP-Phasendiagramm [3]

In dem Diagramm ist das baryonische chemische Potential gegen die Temperatur aufgetragen. Die Kernmaterie, aus der die Gegenstände des Alltags bestehen, ist bei dem schwarzen Dreieck ( $\mu_b = 931 \text{ MeV}$ ,  $T = 0 \text{ MeV}$ ) zu finden. Um diesen Phasenübergang genauer zu beschreiben, bedienen sich die Physiker der sogenannten Gitter-QCD (englisch: L(attice)QCD). Dies ist eine Gitterreichtheorie, die es ermöglicht, numerisch die Übergänge zu beschreiben. Die blaue Linie kennzeichnet den berechneten Phasenübergang 1. Ordnung vom hadronischen Gas zum QGP. Der kritische Punkt grenzt diesen von einem kontinuierlichen Phasenübergang ab. Es sind weiterhin zwei verschiedene Trajektorien für den Freeze-Out eingezeichnet. Zum einen die rosa gepunktete Linie, dort wird von einer festen Energiedichte von  $\epsilon = 500 \text{ MeV/fm}^3$  des Hadronengases ausgegangen. Zum anderen die rosa gestrichelt-gepunktete Linie, die eine feste Baryonendichte von  $n_b = 0.12 \text{ fm}^{-3}$  annimmt. Die Punkte stellen gefittete Daten von Experimenten dar.

Es gilt nun, mit modernster Technik in Teilchenbeschleunigern diesen Phasenübergang detailliert nachzuvollziehen. Dazu werden Atomkerne beschleunigt, um diese miteinander kollidieren zu lassen. So wird für einen kurzen Moment die Temperatur durch die Kollision so stark erhöht, dass ein Übergang ins QGP stattfindet. Die durch den Freeze-Out erzeugten Teilchen werden dann von Detektoren um den Kollisionspunkt herum erfasst. Es werden unter anderem die Energie der Teilchen und ihre Spuren detektiert und daraus Rückschlüsse über den Hergang der Kollision gezogen.

### 1.3 Gliederung

Der Aufbau der Detektoren ist sehr komplex und erfordert höchstes technisches Know-How. Nur im Zusammenspiel aller Detektoren für die unterschiedlichsten Messungen ist die reibungsfreie Rekonstruktion einer Kollision möglich. In dieser Diplomarbeit soll auf eines von sechs Experimenten des **Linear Hadron Collider (LHC)** der Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) in Genf eingegangen werden. **A Large Ion Collider Experiment (ALICE)** beschäftigt sich mit dem Zustand der Materie kurz nach dem Urknall. Im folgenden Kapitel werden der LHC und seine Kenndaten vorgestellt. Hieran schließt sich eine Einleitung zu ALICE und seinen Subdetektoren an. Insbesondere wird der Übergangsstrahlendetektor, der **Transition Radiation Detector (TRD)**, behandelt. Das im Rahmen dieser Diplomarbeit entworfene Gassystem und die damit verbundenen Tests und Ergebnisse werden in zwei einzelnen Kapiteln vorgestellt. Zum Abschluss folgt eine Zusammenfassung.

# 2 Large Hadron Collider

## 2.1 Aufbau

Der Large Hadron Collider ist ein fast 27 km umfassender Beschleuniger, in dem sechs verschiedene Experimente platziert sind. Er verläuft in der Schweiz zwischen dem Juragebirge und der Stadt Genf in einer Tiefe zwischen 175 m (unter dem Juragebirge) und 50 m (auf der dem Genfer See zugewandten Seite). In zwei Vakuumröhren werden Teilchen gegenläufig auf relativistische Energien beschleunigt, um dann in den Experimenten auf Kollisionskurs gebracht zu werden. Dabei addieren sich die Einzelenergien beider Teilchen im Gegensatz zur Kollision gegen ein festes Ziel (fixed-target).

$$E = E_{beam1} + E_{beam2}$$

Beim fixed-target Experiment ist die Kollisionsenergie proportional zur Quadratwurzel der Strahlenergie.

$$E \propto \sqrt{E_{beam}}$$

Der LHC ist nicht exakt kreisförmig und in acht unabhängige Sektoren unterteilt. Jeder dieser Sektoren enthält 154 Dipolmagnete, die dafür sorgen, dass der Teilchenstrahl gekrümmmt wird und nicht die Vakuumröhren verlässt. Jeder dieser insgesamt 1232 Dipolmagnete ist 15 m lang und wiegt rund 35 t. Sie werden mithilfe von suprafluidem Helium auf zwei Kelvin gekühlt, um supraleitende Eigenschaften zu erhalten. Nur so sind die benötigten Feldstärken von bis zu acht Tesla möglich, der Stromfluss beträgt dann bis zu 11700 Ampere. Es gibt auch noch andere Typen von Magneten, so zum Beispiel die Quadrupolmagnete, deren Aufgabe es ist, den Strahl zu fokussieren. Die gesamte Anzahl aller Magnete unterschiedlichen Typs beträgt 9600.

Die zu Beginn der Experimente verwendeten Protonen werden über eine ganze Reihe von Beschleunigern vorbeschleunigt, bevor sie in den LHC injiziert werden. Die Protonen werden erzeugt, indem Wasserstoffatomen ihr Elektron entfernt wird. Dann werden sie in dem Linearbeschleuniger LINAC2 auf 50 MeV beschleunigt und anschließend im sogenannten **Proton Synchrotron Booster** (PSB) ein weiteres Mal auf 1,4 GeV. Daraufhin landen sie im **Proton Synchrotron** (PS), dass die Protonen auf 25 GeV beschleunigt. Das PS ist mit dem **Super Proton Synchroton** (SPS) verbunden. Von dort

aus gelangen die Protonen (diese haben nun eine Energie von 450 GeV) in den LHC. In diesem werden dann die Protonen auf Energien bis zu 7 TeV (= 99.9999991% Lichtgeschwindigkeit) beschleunigt. Dies entspricht dem Impuls einer Fliege im Flug - allerdings komprimiert auf einen unvorstellbar kleinen Punkt: Der Durchmesser eines Protons beträgt nur  $1,7 \cdot 10^{-15}$  m.

Später sind in den Experimenten auch Ionen (zum Beispiel Blei) vorgesehen. Diese werden über den Linearbeschleuniger LINAC3 auf 4,2 MeV pro Nukleon beschleunigt und im **Low Energy Ion Ring** (LEIR) nochmals auf 72 MeV/u. Im PS erreichen sie 5,9 GeV/u. Schließlich werden die Bleikerne im SPS nochmals auf 177 GeV/u beschleunigt, um dann im LHC maximal 2,76 TeV/u zu erreichen.

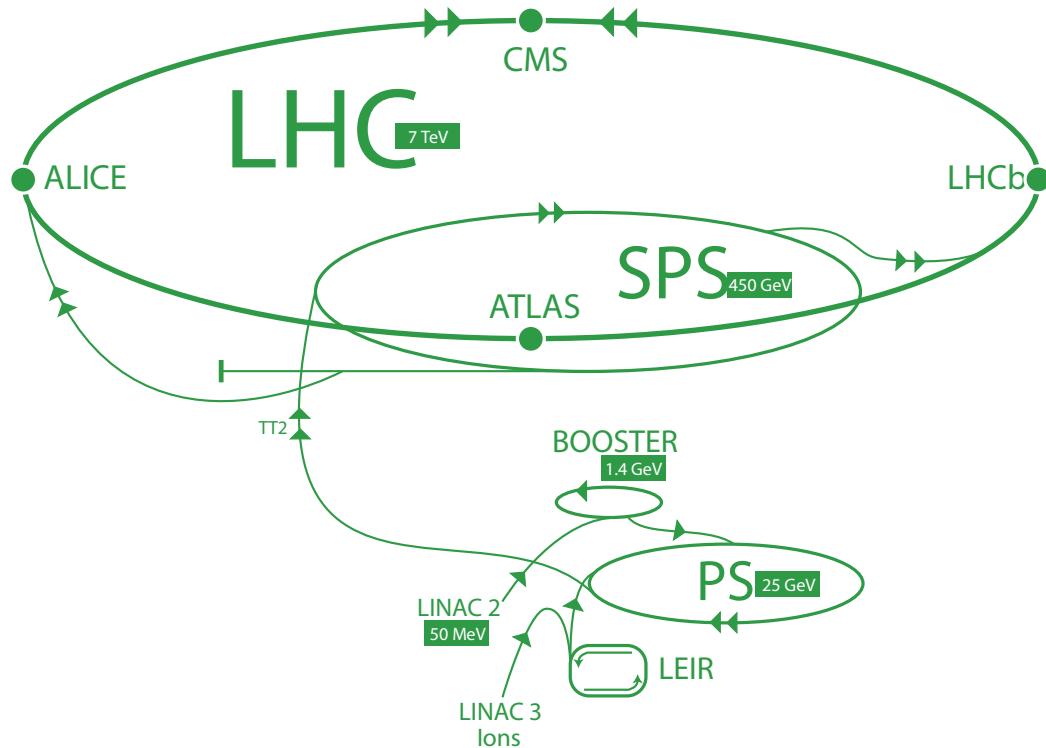


Abbildung 2.1: Der LHC mit seinen Vorbeschleunigern (in grün ist die Energie der Protonen dargestellt) [4]

Aus technischen Gründen werden Protonen und Bleikerne in Paketen, sogenannten **Bunches**, zusammengefasst. Es treffen also immer Pakete von Teilchen aufeinander. Die Anzahl der Teilchen in einem Bunch und deren Abstand im Strahl sind wichtige Kenngrößen des LHC. In der folgenden Tabelle sind sie mit noch weiteren aufgeführt.

Größe	Wert
Umfang	26659 m
Dipol-Magnet Temperatur	1,9 K (-271,3 °C)
Anzahl Magnete	9593
Anzahl Dipolmagnete	1232
Anzahl Quadrupolmagnete	392
Kollisionsenergie Protonen	14 TeV
Kollisionsenergie Ionen	5,5 TeV/Nukleon
max. B-Feld Dipol	8,33 T
min. Abstand zw. Bunches	~ 7 m
Bunches pro Protonenstrahl	2808
Protonen pro Bunch	$1,1 \cdot 10^{11}$
Anzahl Umrundungen	11245 pro Sekunde
Kollisionen pro Sekunde	600 Millionen

Abbildung 2.2: LHC Kenngrößen im Überblick [4]

## 2.2 Die Experimente des LHC

Im Folgenden sollen fünf der sechs am LHC installierten Experimente kurz aufgeführt und vorgestellt werden. Auf ein näheres Eingehen auf ALICE wird zugunsten des nächstens Kapitels verzichtet.

### 2.2.1 ATLAS

ATLAS ist neben CMS ein Universalendetektor. Er deckt einen weiten Bereich der Physik ab und sucht unter anderem nach dem Higgs-Boson, dem vorhergesagten Wechselwirkungsteilchen, das den anderen Wechselwirkungsteilchen ihre Masse verleiht. Ein anderer Schwerpunkt von ATLAS ist die Suche nach der dunklen Materie [5].

### 2.2.2 Compact Muon Solenoid (CMS)

CMS hat dieselben physikalischen Ziele wie ATLAS, aber ein anderes technisches Design [6].

### 2.2.3 Large Hadron Collider beauty (LHCb)

LHCb studiert die leichte Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie. Dies wird durch die Untersuchung von Teilchen realisiert, die ein b-Quark beinhalten. Der erste Subdetektor ist um den Kollisionspunkt gebaut, der zweite steht hinter dem ersten und ist 20 m lang [7].

## 2.2.4 Large Hadron Collider forward (LHCf)

LHCf ist ein kleines Experiment, welches Teilchen messen möchte, die mit sehr geringen Winkeln zur Strahlachse bei Proton-Proton-Kollisionen im ATLAS Experiment entstehen. Daher sind Detektoren 140 m vom ATLAS Kollisionspunkt entfernt in der Nähe der Strahlachse installiert [8].

## 2.2.5 TOTal Elastic and diffractive cross section Measurement(TOTEM)

Auch TOTEM misst Partikel, die sehr dicht an der Strahlachse produziert werden. Damit kann die effektive Größe bzw. der Querschnitt der Protonen im LHC bestimmt werden. Um so nahe wie möglich an die Strahlachse zu kommen, sind die Detektoren in Vakuumröhren eingelassen (sogenannte "Roman pots"). Diese sind in Paaren in unmittelbarer Nähe zum CMS Experiment an vier Punkten an den Strahlröhren installiert [9].

## 3 ALICE

Mit ALICE möchte man am CERN die physikalischen Vorgänge in der Zeit direkt nach Entstehung des Universums, kurz nach dem Urknall, rekonstruieren. Um die gleichen Temperaturen und Drücke im Experiment nachzustellen, die zu dieser Zeit herrschten, werden schwere Atomkerne auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und zur Kollision gebracht.

Die vielen Teilchen, die bei einer Schwerionenkollision entstehen, müssen detektiert und ihre Spuren vermessen werden, um Rückschlüsse über den Hergang der Kollision zu erhalten. Dazu sind um den Kollisionspunkt viele Detektoren fassförmig für verschiedene Aufgaben installiert worden. Das gesamte Experiment ist mit den vielen zylindrischen Detektoren in einem 25 m langen und 15 m hohen Solenoidmagneten (dem sogenannten L3 Magneten, er stammt von dem L3 LEP Experiment [10]) eingebaut. Dieser erzeugt ein homogenes Magnetfeld von bis zu 0,5 T [11], welches parallel zu der Strahlachse ausgerichtet ist. Alle erzeugten geladenen Teilchen werden nun innerhalb des Magneten, abhängig von ihrem Impuls, auf eine Kreisbahn gezwungen.

Außerhalb des Magneten schließt sich noch in Strahlrichtung der sogenannten Myonenarm an, der Myonen nachweist.

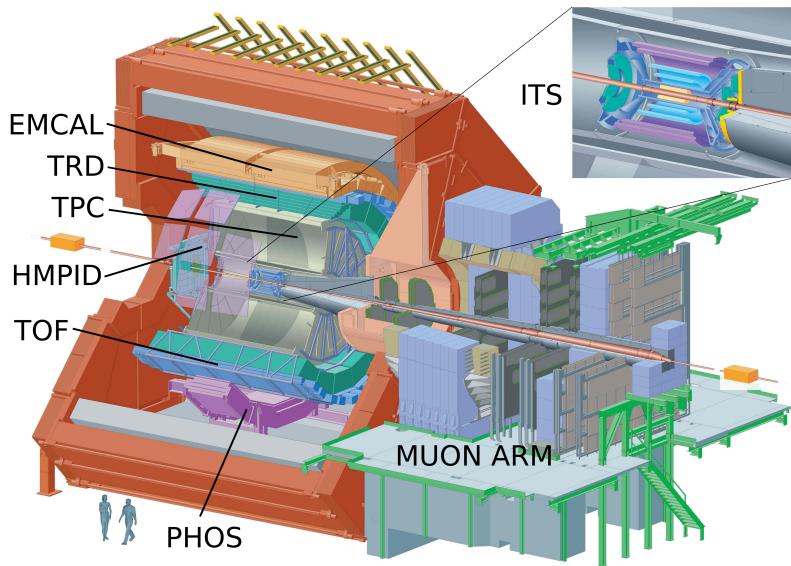


Abbildung 3.1: Computergrafik des schematischen Aufbaus des Alice-Detektors [12]

## 3.1 Die Subdetektoren

### 3.1.1 Inner Tracking System (ITS)

Die Hauptaufgabe des ITS liegt in der Bestimmung des Kollisionspunktes (Vertex). Sechs Schichten aus Detektoren im Abstand zwischen 6 und 43 cm zur Strahlachse sorgen für den Nachweis. Die inneren beiden Schichten sind Silizium-Pixel-Detektoren. Danach folgen zwei Silizium-Drift-Detektoren. Die äußersten beiden Schichten sind doppelseitige Silizium-Strip-Detektoren. Mit dieser Kombination ist es möglich, auch Teilchen mit einer sehr geringen Energie nachzuweisen. Da die innersten und äußersten Detektorschichten analog auslesbar sind, können Teilchen auch über den Energieverlust ( $\frac{dE}{dx}$ ) identifiziert werden. Insgesamt beinhaltet das ITS über 12,5 Millionen Auslesekanäle [11].

### 3.1.2 Time Projection Chamber (TPC)

Dem ITS schließt sich die TPC an, die hauptsächlich für das Tracking und die Hadronenidentifizierung zuständig ist. Die zylindrische Kammer mit einer Länge von 5 m, einem inneren Radius von 85 cm und einem äußeren Radius von 250 cm ist mit  $90 \text{ m}^3$  der Gasmischung  $\text{Ne} / \text{CO}_2 / \text{N}_2$  gefüllt. Die Kammer ist in ihrer Länge in zwei Driftbereiche von je 2,5 m aufgeteilt. Die Feldstärke beträgt 400 V/cm. Es liegt somit am Driftbereich eine Hochspannung von 100 kV an. Vieldrahtproportionalkammern an den äußeren beiden Seiten lesen die Driftinformationen aus. Bei der höchsten vorhergesagten Dichte an geladenen Teilchen von  $\frac{dN}{d\eta} = 8000$  beträgt die Anzahl der primären und sekundären Spuren in der TPC 20000. Eine gute Impulsauflösung der TPC ist einem weiten Bereich für Transversalimpulse von  $0,1 \text{ GeV}/c$  bis  $100 \text{ GeV}/c$  gegeben [11].

### 3.1.3 Transition Radiation Detector (TRD)

Der Übergangsstrahlendetektor wird im nächsten Kapitel beschrieben.

### 3.1.4 Time-of-Flight (TOF)

Der TOF Detektor misst die Flugzeit der Teilchen und kann Pionen und Kaonen ( $0,5$ - $3,0 \text{ GeV}/c$ , Anteil falsch identifizierter Teilchen  $< 20\%$ ) und Protonen ( $0,5$ - $6,0 \text{ GeV}/c$ , Anteil falsch identifizierter Teilchen  $< 15\%$ ) sowie Elektronen ( $0,3$ - $0,5 \text{ GeV}/c$ , Anteil falsch identifizierter Teilchen  $< 10\%$ ) identifizieren. Die Zeitauflösung beträgt 38 ps. Zusammen mit dem ITS und der TPC werden die Spuren der Teilchen rekonstruiert und der Energieverlust für den Bereich bis zu  $1 \text{ GeV}/c$  bestimmt. Der Detektor grenzt direkt an den Transition Radiation Detector an und besteht wie dieser aus 18 Modulen. Die Dicke der TOF Module beträgt knapp 30 cm [11].

### 3.1.5 High Momentum Particle Identification (HMPID)

Der HMPID misst ausschließlich Hadronen mit einem Transversalimpuls  $p_t > 1 \text{ GeV}/c$ . Dies soll ALICE ermöglichen, die Teilchen zu identifizieren, die nicht mit ITS und TPC (Energieverlust) oder dem TOF (Flugzeit) identifizierbar sind. Der Detektor besteht aus sieben Modulen zu je  $1,5 \cdot 1,5 \text{ m}^2$ . Es handelt sich dabei um Ring Imaging Cherenkov (RICH) Zähler mit davor installierten Radiatoren (15 mm dick, gefüllt mit flüssigem  $\text{C}_6\text{F}_{14}$ ). Die RICH Zähler messen dabei den Winkel zwischen dem emittierten Tscherenkov-Licht und der Spur des Teilchens. Die Hauptaufgabe besteht darin, Pionen und Kaonen bis  $3 \text{ GeV}/c$  und Kaonen und Protonen bis zu  $5 \text{ GeV}/c$  separieren zu können. Die Form des Detektors ist durch die gewünschte Teilchenausbeute in Proton-Proton und Schwerionenkollisionen sowie den für Zwei-Teilchen Korrelationsmessungen benötigten großen Öffnungswinkel gegeben [11].

### 3.1.6 ElectroMagnetic CALorimeter (EMCAL)

Das EMCAL soll im Detail die Physik des sogenannten Jet Quenchings näher untersuchen. Damit ist die Wechselwirkung von hochenergetischen Partonen mit dichter Materie gemeint. Bei dem Kalorimeter handelt es sich um ein Blei-Szintillator-Sandwich. Es ist aus 77 Schichten mit abwechselnd 1,44 mm Blei und 1,76 mm Szintillator aufgebaut. Das Kalorimeter befindet sich in einem Abstand von ungefähr 4,5 m zur Strahlachse und deckt einen Azimutalwinkel von  $\Delta\phi = 107^\circ$  ab [11].

### 3.1.7 Photon Spectrometer (PHOS)

PHOS untersucht nur einen kleinen Bereich bei der Kollision und ist unmittelbar unter dem Kollisionspunkt installiert. Das Spektrometer untersucht direkte Photonen und wie EMCAL Jet Quenching bei hochenergetischen  $\pi^0$ . Es besteht aus einem elektromagnetischen Kalorimeter und einem Detektor, der geladene Teilchen entdeckt (Effizienz  $> 99\%$ ) und für diesen Fall die Auswertung stoppt [11].

### 3.1.8 Muon Spectrometer

Das Myonen Spektrometer hat die Aufgabe, das komplette Spektrum der aus schweren Quarks bestehenden Mesonen ( $J/\Psi$ ,  $\Psi'$ ,  $\Upsilon$ ,  $\Upsilon'$  und  $\Upsilon''$ ), als auch das  $\phi$  Meson, über Zerfälle in Myonen zu vermessen. Es besteht aus einem passiven Absorber (aus Karbon und Beton), der Hadronen und Photonen vom Kollisionspunkt abschirmt, einem Trackingsystem aus fünf Doppelagen, wo sich sich zwei vor, eine im und zwei hinter dem großen Dipolmagneten befinden. Eine massive 1,2 m dicke Wand aus Eisen dient als passiver Myonen-Filter (bis  $4 \text{ GeV}/c$ ), gefolgt von zwei Doppelagen eines Triggersystems. [11].

# 4 ALICE TRD

Die Aufgabe des Übergangsstrahlendetektors ist es, mithilfe der Übergangsstrahlung Pionen von Elektronen zu separieren und einen Beitrag zur Spurrekonstruktion zu leisten. Dies ist ab einem Impuls von  $1 \text{ GeV}/c$  möglich. Bis zu diesem Impuls geschieht dies in der TPC über die Messung des spezifischen Energieverlustes.

Weiterhin ist der TRD in der Lage, schnelle Entscheidungen (Trigger) hinsichtlich des Vorhandenseins geladener Teilchen mit hohem Transversal-Impuls zu treffen und diese an andere Detektoren weiterzuleiten. So können interessante Ereignisse selektiert werden.

## 4.1 Aufbau

Der TRD besteht aus 540 einzelnen Detektorkammern. Diese sind in 18 Supermodulen zu je 30 Kammern verteilt. Jedes Supermodul umfasst sechs Lagen mit je fünf Kammern. In jeder Lage nimmt die Breite der Kammern zu, da das Supermodul im Querschnitt trapezförmig ist (siehe Abbildung 4.1). Die Länge eines einzelnen Supermoduls beträgt 7 m, es wiegt ca 1,8 Tonnen.

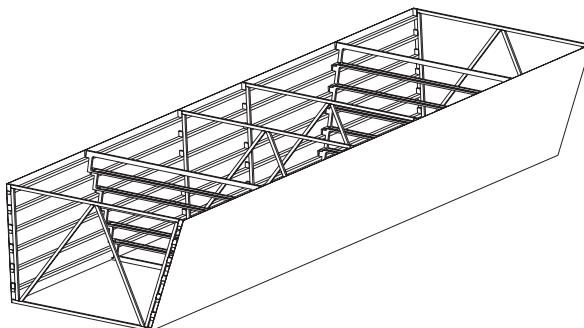


Abbildung 4.1: Ein sogenanntes Supermodul des TRD, bestehend aus 30 Detektorkammern [13]

Die einzelnen Supermodule sind im sogenannten Spaceframe zwischen der TPC und dem TOF Detektor angeordnet.

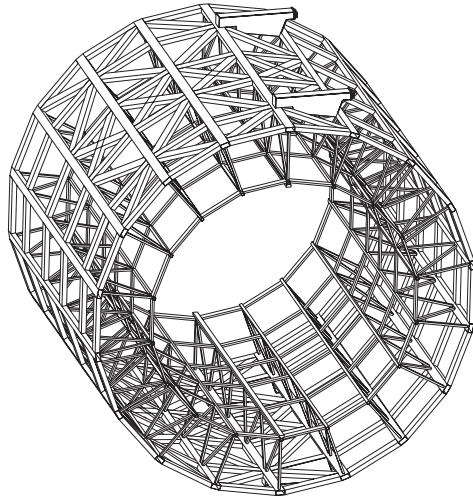


Abbildung 4.2: Spaceframe zum Einschub der 18 Supermodule, installiert zwischen TPC und TOF Detektor [13]

Jede einzelne Kammer besteht aus einem Rohacell/Polypropylen-Radiator mit einer Dicke von 48 mm, einer 30 mm langen Driftsektion und einer Vieldraht-Proportional-Kammer von 7 mm, an die sich die Auslesepads anschließen. Um die Kammer zu stabilisieren, ist auf dieser ein wabenförmiges Karbonfaser-Sandwichbackpanel montiert. Es garantiert die Stabilität der Kammer bei gleichzeitig sehr geringem Gewicht und geringer Selbstabsorption. Abschließend ist die Ausleseelektronik auf diesem Sandwichbackpanel montiert.

Die mittlere Kammer einer jeden Lage (C0-Typ) eines Supermoduls besteht aus 12 Reihen von Auslesepads, jede andere Kammer (C1-Typ) aus 16. Jede Reihe besteht wiederum aus 144 Pads. Jedes Pad wird als eigener Kanal in der Ausleseelektronik verarbeitet. Ein sogenanntes MCM (Multi Chip Module) erfasst 21 Kanäle. Die Gesamtkanalanzahl beträgt somit  $1,18 \cdot 10^6$ . Die Padoberfläche in allen 540 Kammern summiert sich auf insgesamt  $716 \text{ m}^2$ .

## 4.2 Funktion

Pionen und Elektronen treffen auf die Kammer und durchdringen den Radiator. Der Radiator aus Rohacellschaum und Polypropylenfasern stellt einen sehr häufigen Wechsel zwischen einem Kunststoff und der eingebetteten Luft dar. Ein geladenes Teilchen bildet an der Grenzfläche mit seiner Spiegelladung einen Dipol, der sich zeitlich ändert. Der Dipol strahlt dann Photonen ab. Diese Strahlung nennt man Übergangsstrahlung (engl.: Transition Radiation, TR). Die Intensität und Winkelverteilung der abgestrahlten Photonen hängt vom Lorentzfaktor ab  $\gamma = \frac{E}{m_0 c^2}$  und ist deshalb bei gleichem Impuls bei Elektronen ( $m_0 = 0,5 \text{ MeV}$ ) viel ausgeprägter als bei den sehr viel schwereren Pionen ( $m_0 = 139,5 \text{ MeV}$ )

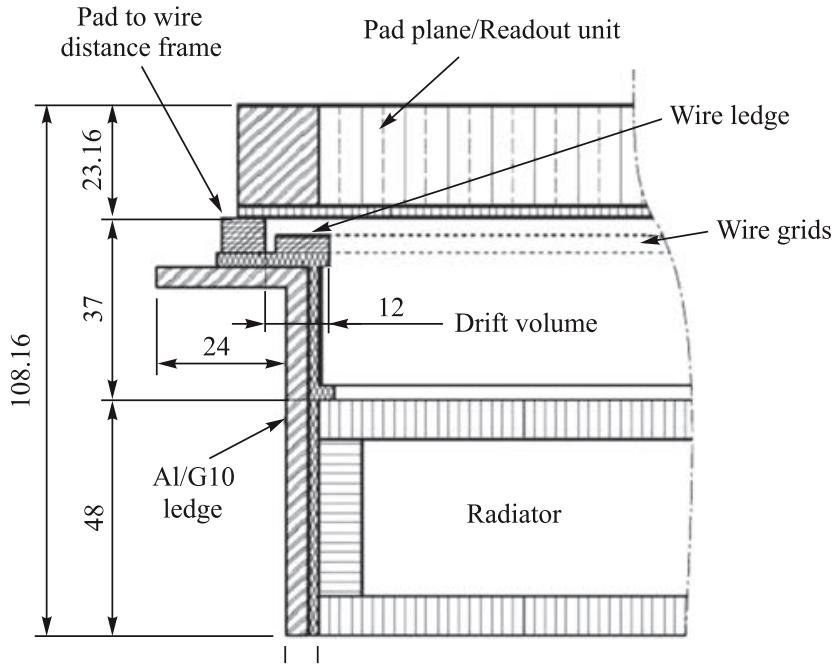


Abbildung 4.3: Querschnitt durch eine Kammer des TRD Detektor [13]

Ab  $\gamma \approx 1000$  wird die Übergangsstrahlung erzeugt. Die abgestrahlten Photonen liegen im Bereich von 1 bis 30 keV. Das Maximum der Winkelverteilung liegt dabei in Vorwärtsrichtung, also der Flugrichtung des Elektrons.

Das in der Kammer enthaltene Gas wird von Pionen, Elektronen und auch von der erzeugten TR ionisiert. Da zwischen Driftelektrode und Kathodendrähten der Vieldraht-Proportional-Kammer ein homogenes elektrisches Feld von bis zu 700 V/cm anliegt, driften die Elektronen mit konstanter Geschwindigkeit durch den 3 cm langen Driftbereich zur Verstärkungszone. Dort liegt ein sehr starkes inhomogenes elektrisches Feld an, welches die Elektronen so stark beschleunigt, dass weitere Elektronen lawinenartig freigesetzt werden. Die Gasverstärkung beträgt  $5 \cdot 10^3 - 10^4$ .

Die Elektronen werden von den Anodendrähten eingefangen. Die Ionen induzieren eine Spiegelladung auf den Pads, die von der Elektronik ausgelesen werden. Aufgrund ihrer höheren Masse driften die Ionen wesentlich langsamer als die Elektronen zu der Padplane und den Kathodendrähten.

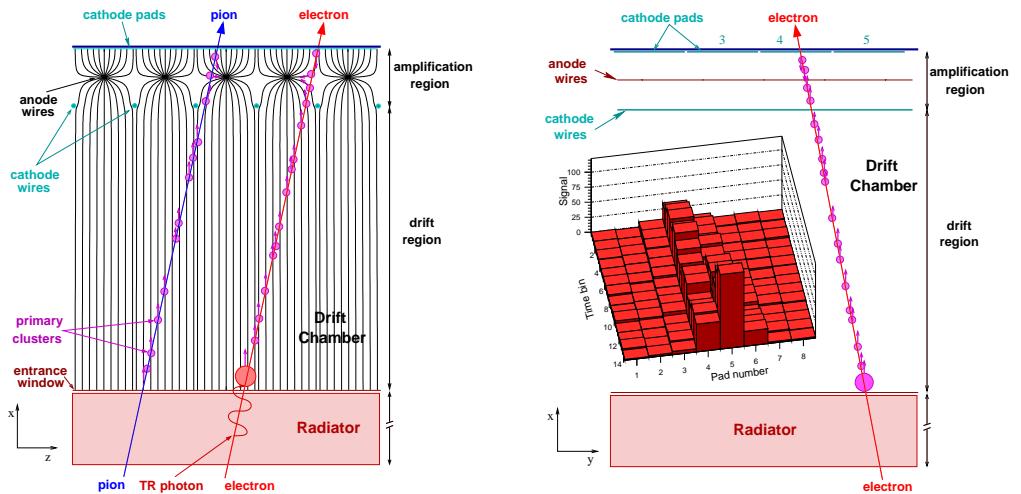


Abbildung 4.4: Links r-z-Ansicht eines Detektormoduls, rechts die r- $\phi$ -Ansicht. Gezeigt ist der Spurverlauf in dem Gasvolumen, rechts die Ladungsdeposition auf den Pads in zeitlicher Abhängigkeit [13]

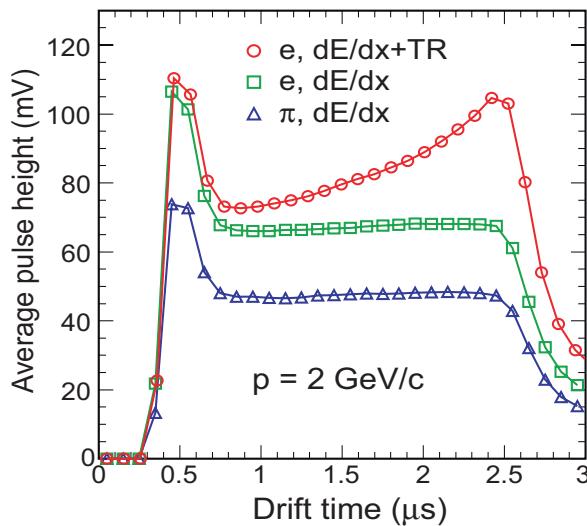


Abbildung 4.5: Hier ist die durchschnittliche Pulshöhe aufgetragen gegen die Driftzeit für Pionen (Dreiecke), Elektronen ohne Radiator (Quadrate) und Elektronen mit Radiator (Kreise) bei  $2 \text{ GeV}/c$  [11]

Pro Ereignis vermisst die Auswertelektronik (MCMs) von jedem Pad über einen Zeitraum von maximal 30 Timebins von jeweils  $0.1 \mu\text{s}$  die deponierte Ladung. So kann je nach Driftgeschwindigkeit über die gesamte Driftstrecke der zeitliche Signalverlauf dargestellt werden. Dazu mehr in Kapitel 4.3.2.

In Abbildung 4.5 erkennt man zwei Effekte, die eine Abgrenzung zwischen Elektronen und Pionen ermöglichen: Zum einen der höhere spezifische Energieverlust der Elek-

tronen im Vergleich zu den Pionen und zum anderens die Absorption der von den Elektronen im Radiator erzeugten TR (zweiter Peak im Diagramm bei ca.  $2,5 \mu\text{s}$ ).

## 4.3 Gas

### 4.3.1 Detektorgas

Die verwendete Gasmischung besteht zu 85% aus Xenon und zu 15% aus  $\text{CO}_2$ . Es ist wichtig, dass die TR-Photonen gut vom Gas absorbiert werden, um den Nachweis der TR leisten zu können. In der Abbildung 4.6 sind für verschiedene Edelgase die Absorptionslängen gegen die Photonenergie aufgetragen. Man sieht, dass ein typisches TR-Photon mit einer Energie von 10 keV in Xenon eine Absorptionslänge von 1 cm aufweist, während diese für andere Edelgase wie Kr und Ar um einen Faktor 5-10 größer ist.

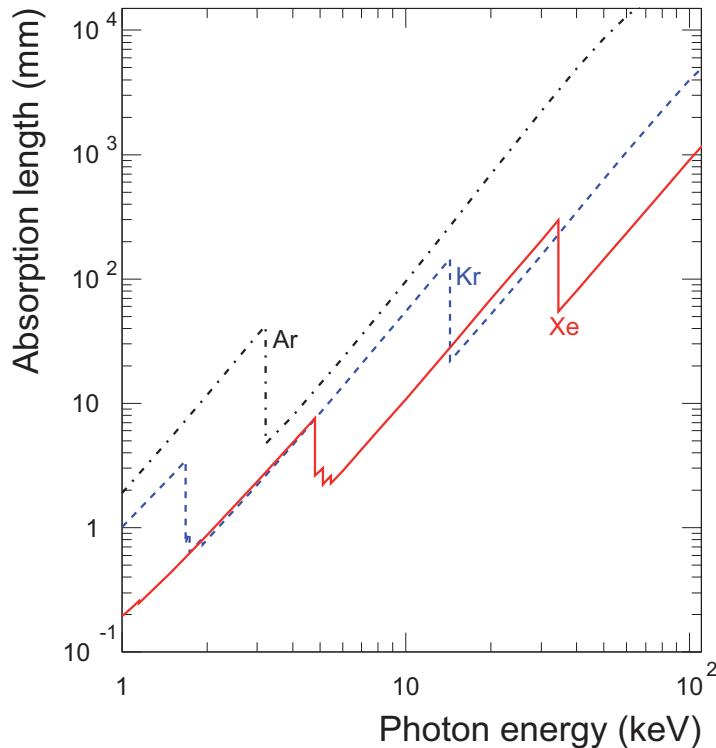


Abbildung 4.6: Absorptionslängen für Röntgenphotonen in verschiedenen Edelgasen [13]

Als Löschgas wird  $\text{CO}_2$  verwendet, da es nicht, wie viele andere organische Löschgase, entflammbar ist. Des Weiteren enthalten organische Moleküle Wasserstoff, der einen

zusätzlichen Hintergrund erzeugt (sogenannte knock-on Protonen). Löschgas wird generell benötigt, damit im Verstärkungsbereich von nicht ionisierten, sondern angeregten Gasmolekülen emittierte Photonen nicht andernorts im Gasvolumen des Detektors Sekundärentladungen erzeugen. Diese Photonen werden dann vom Löschgas absorbiert.

#### 4.3.2 Driftgeschwindigkeit und Diffusion

Es wurde eine Driftgeschwindigkeit von  $1,5 \text{ cm}/\mu\text{s}$  gewählt, was einer gesamten Driftzeit von  $2 \mu\text{s}$  über die maximale Driftstrecke von  $3 \text{ cm}$  entspricht. Garfield/Magboltz Berechnungen [14] [15] zeigen für die am CERN verwendete Mischung  $\text{Xe},\text{CO}_2$  (85%,15%) eine benötigte Drift-Feldstärke von  $700 \text{ V/cm}$ . Dies entspricht einem Potential an der Driftelektrode von  $-2,1 \text{ kV}$  [13]. Bei dieser Driftspannung betragen die longitudinalen und transversalen Diffusionskoeffizienten  $D_L = 250 \mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$  und  $D_T = 180 \mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$  (siehe Abbildung 4.7).

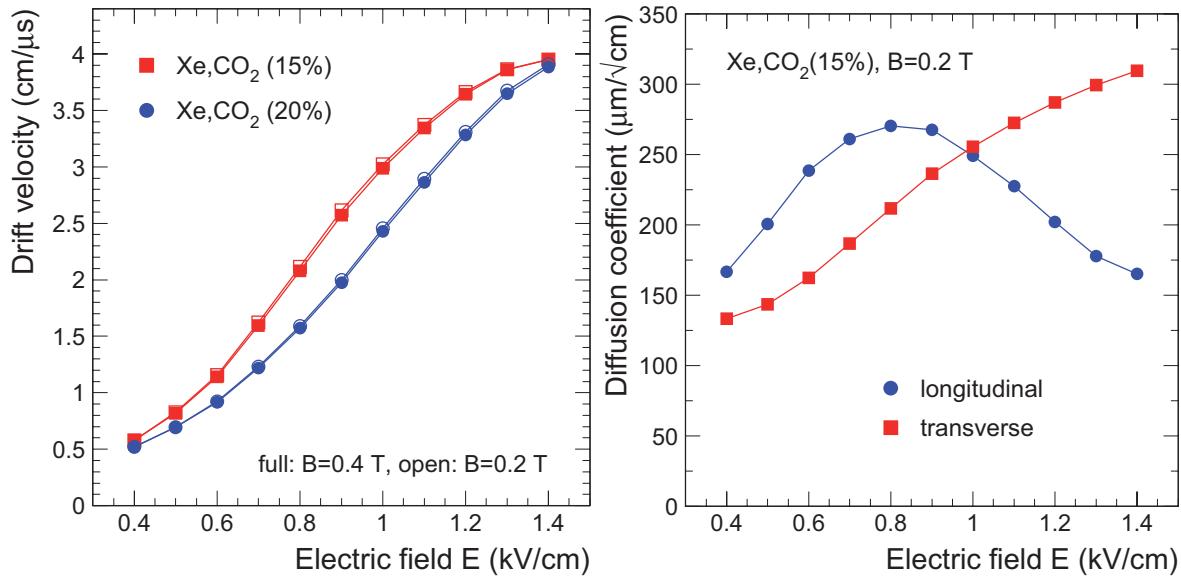


Abbildung 4.7: Links Garfield/Magboltz Berechnungen für die Driftgeschwindigkeit und rechts Diffusions Koeffizienten als Funktion der elektrischen Driftfeldstärke [13]

Aufgrund der kurzen Driftstrecke von  $3 \text{ cm}$  beträgt die maximale Aufweitung einer punktförmigen Ladungswolke nur  $300\text{-}500 \mu\text{m}$ . Der Effekt auf die Pulsform oder die Ortsauflösung ist vernachlässigbar [13].

#### 4.3.3 Elektronenanhang durch Gasverunreinigungen

Auf dem Weg zum Verstärkungsbereich können driftende Elektronen durch elektro-negative Fremdstoffe, hauptsächlich Sauerstoff, absorbiert werden. Der Signalverlust

durch diesen Elektronenanhang ist gegeben durch den absoluten Druck  $p$  und den Partialdruck des Sauerstoffs im Gas  $p(O_2)$  und folgt einem exponentiellen Verhalten, abhängig von der Driftzeit  $t_{drift}$ :

$$N(t_{drift}) = N(0) \cdot \exp(-p \cdot p(O_2) \cdot C_{att} \cdot t_{drift})$$

Der Anhangskoeffizient (engl. attachment coefficient)  $C_{att}$  hängt vom Gasgemisch ab. Für Gemische, die  $CO_2$  beinhalten ist er sehr groß, da Kohlendioxid viele niedrige Anregungsniveaus besitzt. In Abbildung 4.8 ist der Anhangskoeffizient für verschiedene Gasmischungen gegenüber der elektrischen Feldstärke aufgetragen. Bei der  $Xe,CO_2$  (85%,15%) Mischung beträgt bei einer Sauerstoffverunreinigung von 100 ppm  $C_{att} = 400 \text{ atm}^{-2} \mu\text{s}^{-1}$ . Für eine Driftzeit von 2  $\mu\text{s}$  entspricht dies einem Signalverlust von weniger als 10% [13].

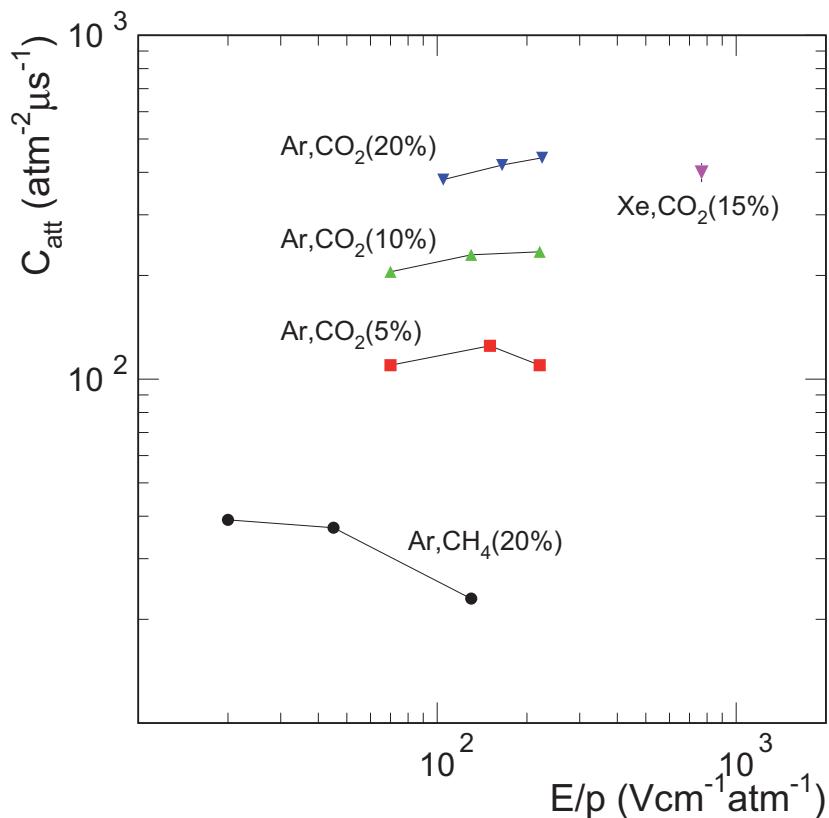


Abbildung 4.8: Der Elektronanhangskoeffizient als Funktion der elektrischen Driftfeldstärke für verschiedene Gasmischungen [13]

Weitere Messungen mit höheren Sauerstoffkonzentrationen von 250 und 400 ppm für die Mischung  $Xe,CO_2$  (85%,15%) ergaben, dass leichte Einbußen in der Elektron-Pion-Separation zu erwarten sind. Daher sind höhere Konzentrationen von Sauerstoff zu vermieden (siehe Abbildung 4.9) [13].

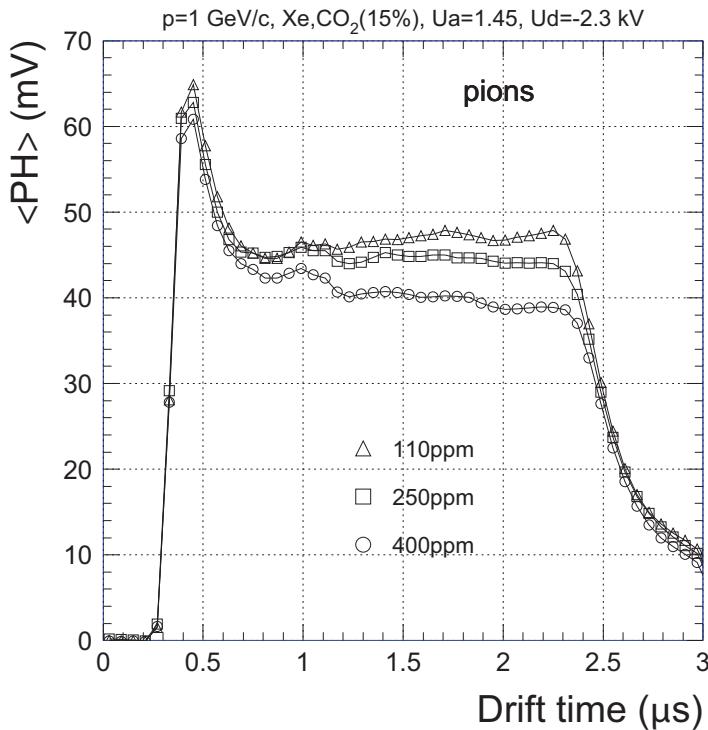


Abbildung 4.9: Die Pulshöhe als Funktion des Sauerstoffgehaltes [13]

#### 4.3.4 CERN Gassystem

Die Aufgabe des Gassystems ist es, die verwendeten Gaskomponenten im gewünschten Verhältnis zu mischen und mit einem Betriebsdruck von weniger als 1 mbar Überdruck im Vergleich zum Atmosphärendruck durch die TRD Kammern zu spülen. Da Xenon sehr teuer ist, lässt man das Gas in einem geschlossenen Kreislauf zirkulieren. Durch Lecks in den Kammern dringt Luft ein ( $O_2$ ,  $N_2$ ). Der Sauerstoff kann relativ leicht durch entsprechende Filter entfernt werden, während hingegen Stickstoff schwer zu entfernen ist [16]. Eine aufwändige Reinigung muss vorgenommen werden. Während der Datennahme (Betriebszeit) ist also dafür zu sorgen, dass das Mischungverhältnis der verwendeten Gase konstant bleibt. Die für Gaskomponenten verwendeten Massenflussregler weisen eine absolute Stabilität des eingestellten Flusses von 0.3% über ein Jahr auf und für mittlere Zeiträume 0.1% [13].

Größe	Wert
Module	540
Maximales Volumen	27.2 m <sup>3</sup>
Gasgemisch	Xe, CO <sub>2</sub>
Maximaler Überdruck	1 mbar
Einfüllrate	5 m <sup>3</sup> /h
Zirkulationsflußrate	5 m <sup>3</sup> /h
Betriebszeit pro Jahr	8 Monate

Abbildung 4.10: TRD Gassystem Kenngrößen im Überblick [13]

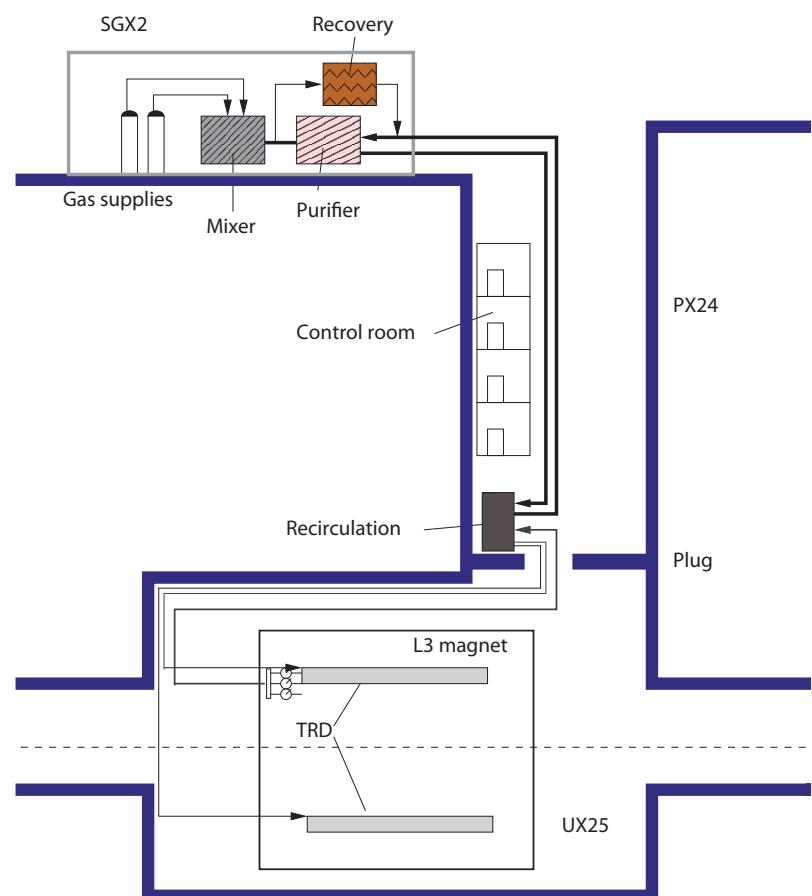


Abbildung 4.11: Schematischer Aufbau des TRD Gassystems [13]

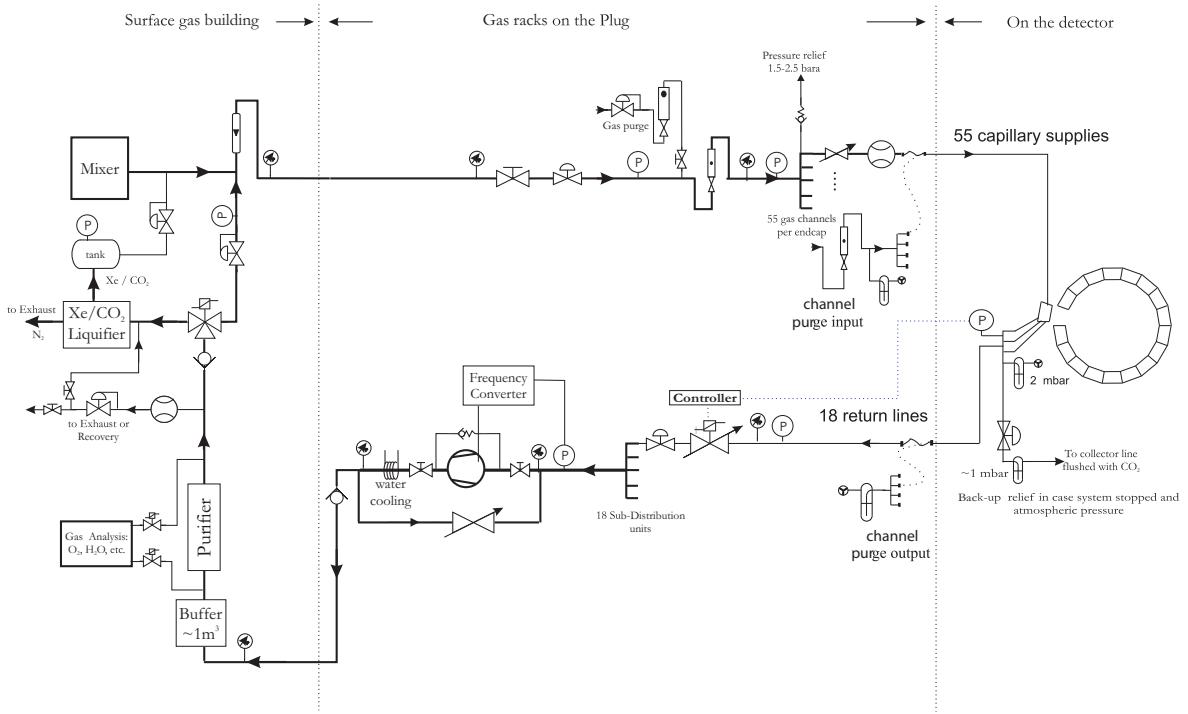


Abbildung 4.12: Detailierter Aufbau der Zirkulationsschleife [13]

Abbildung 4.12 zeigt den detaillierten Aufbau des Gassystems. Auf der linken Seite ist die Mischeinheit für die Gaskomponenten und die Abscheideeinrichtung für Stickstoff zu erkennen. Die Temperatur, die benötigt wird, um Stickstoff zu verflüssigen, liegt bei  $-195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , für Xenon bei  $-108,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  [13]. Die Gaskomponenten werden nach der Reinigung und Trennung wieder ihren Vorratsbehältern zugeführt.

Auf der rechten Seite ist der TRD zu sehen. Bedingt durch seine Höhe von 7,36 m kann der hydrostatische Druck durch das Gas (Xenon hat eine Dichte von 5,56 g/l) nicht vernachlässigt werden. Da sein Wert von 2,5 mbar über dem zulässigen Betriebsdruck läge, muss der TRD in verschiedene Sektionen unterteilt werden. Für jede Sektion muss der Druck individuell eingestellt werden. In der Mitte der Abbildung sind die dafür notwendigen Vorkehrungen zu erkennen. Ebenso gilt es darauf zu achten, die Drucksensoren so dicht wie möglich an den Kammern zu positionieren, um hydrostatische und hydrodynamische Druckdifferenzen zu minimieren. Um Schäden durch eine mögliche Fehlfunktion der Druckregelung zu vermeiden, sind 2-Wege-Bubbler in der Nähe der Kammern installiert. Sie stellen sicher, dass für den Fall von zu hohem Überdruck das Gas entweichen und im Fall eines zu hohen Unterdrucks Luft eingesaugt werden kann.

### 4.3.5 Situation in Münster

Beim Zusammenbau der Supermodule in Münster wird zum Betrieb Argon als Edelgas verwendet, da es zu 0.9% in der Erdatmosphäre vorhanden und damit wesentlich günstiger als Xenon ist. TR Photonen können nicht nachgewiesen werden, da die kosmische Höhenstrahlung von der Oberseite in die Kammer eindringt, der die TR erzeugende Radiator sich jedoch auf der Unterseite befindet. Die erzeugten TR-Photonen sind nicht energetisch genug, um die im Supermodul folgende Kammeroberseite zu durchqueren.

Es wird die Mischung Ar,CO<sub>2</sub> (83%,17%) verwendet. Auch in Münster ist eine Driftgeschwindigkeit von 1,5  $\mu$ s gewünscht. Für verschiedene Gaszusammensetzungen Ar,CO<sub>2</sub> wurde in Garfield/Magboltz die Funktion von der Driftgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der elektrischen Driftfeldstärke simuliert (siehe Abb. 4.13).

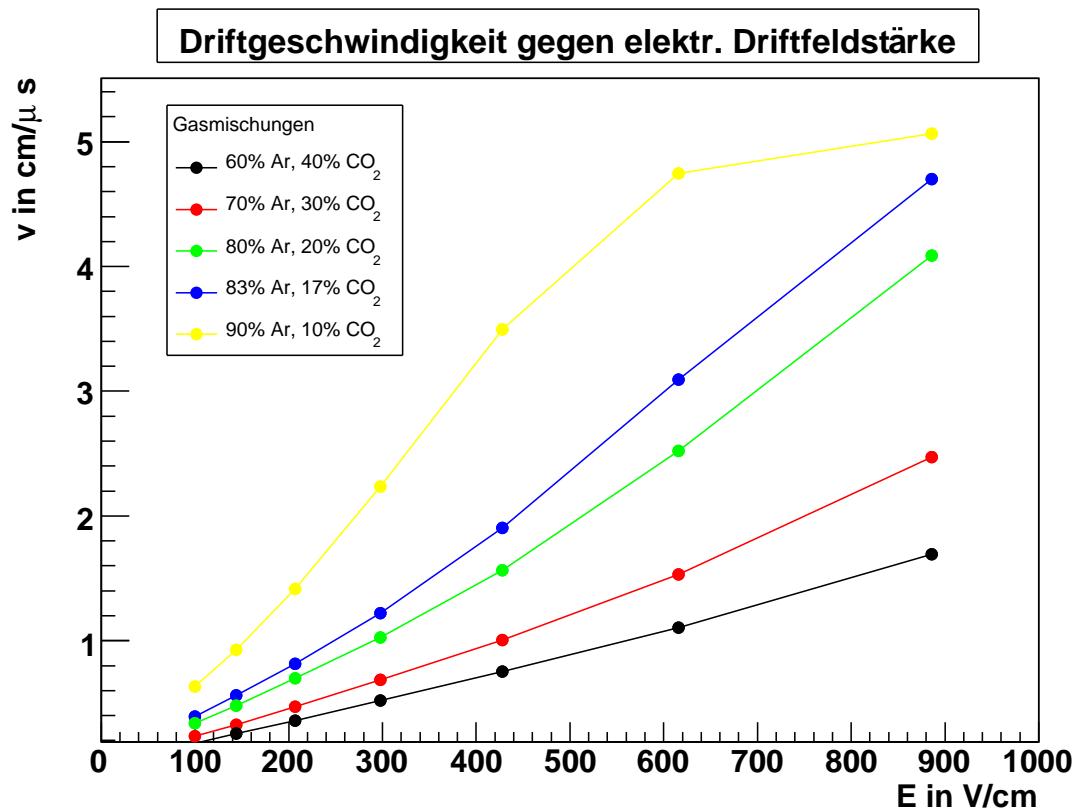


Abbildung 4.13: Die Driftgeschwindigkeit aufgetragen gegen die elektrischen Driftfeldstärke

Im nächsten Kapitel wird detailliert auf das Gassystem in Münster eingegangen.

# 5 Gassystem

## 5.1 Zielsetzung

Sinn und Zweck des Gassystems ist es, zu gewährleisten, dass beim Zusammenbau der Supermodule die Kammern betrieben werden können. Dies ist nötig, um die Funktion zu gewährleisten, Daten zu nehmen und eventuelle Probleme zu erkennen und zu beheben, noch bevor die Supermodule von Münster zum CERN transportiert werden.

Um die Kammern betreiben zu können, muss die Zusammensetzung der Gasmischung Argon,  $\text{CO}_2$  frei einstellbar sein. Hochspannungstests werden unter anderem in reinem  $\text{CO}_2$  durchgeführt. Um die Gastests (dazu siehe Kapitel 6) durchführen zu können, ist es von Vorteil, zwei separate Gaslinien zur Verfügung zu haben, da dann zeitgleich der Betrieb der bereits installierten Lagen mit der gewünschten Gasmischung (sogenannte Mixline) möglich ist, als auch Tests mit der frisch installierten Lage (sogenannte Flushline).

## 5.2 Hardware

Das Gassystem besteht aus einem externen Flaschenlager, der Mischvorrichtung für zwei separate Linien und einem Massenspektrometer zur Gasanalyse. In Abbildung 5.1 ist der schematische Aufbau gezeigt. Die Massenflussregler (engl.: massflowcontroller, MFC) steuern die Mischung des Gases. Optional ist es möglich, auch manuell gewünschte Flussraten einzustellen (Handregler). Die verwendeten Gassorten sind Kohlendioxid 4.5 (Reinheit 99,995% in einer 50 Liter 37,5 kg Flasche) und Argon 4.6 Reinheit 99,996% in einer 50 l 200 bar Flasche). Der Restsauerstoffgehalt liegt bei Kohlendioxid  $\leq 15$  ppm und bei Argon  $\leq 4$  ppm [17]. Die Massenflussregler benötigen einen Betriebsdruck von 2 bar absolut, dieser wird über die Druckminderer eingestellt.

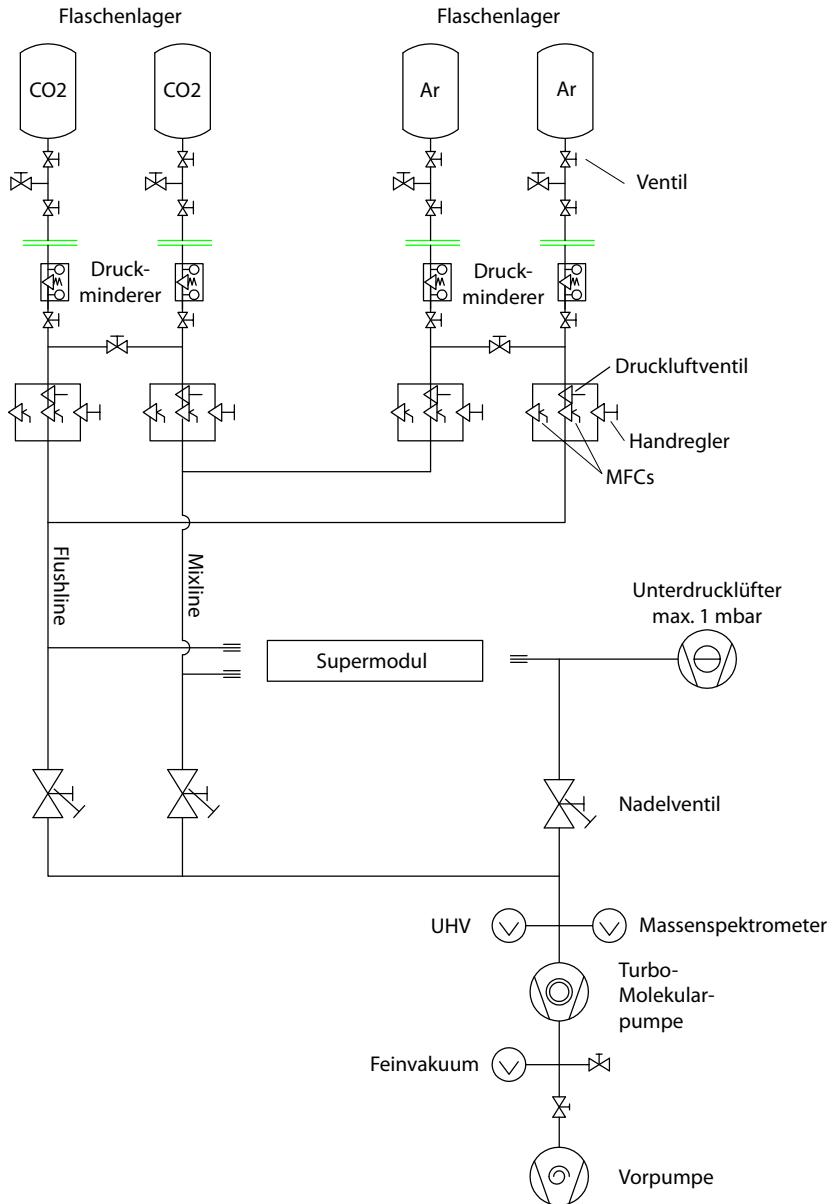


Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau des Gassystems

### 5.2.1 Massenflussregler

Die Massenflussregler (MFC) vom Typ M330 der Firma MKS werden vom Kontrollgerät MGC647C angesteuert. Dieses besitzt eine RS-232 Schnittstelle und kann bis zu acht MFCs ansteuern. Die Auslese der gemessenen Flussraten sowie die Einstellung der MFC erfolgt über die Software mgc647c-dimsrv (siehe 5.3.3), kann aber auch direkt am Kontrollgerät stattfinden. Es werden für jedes der beiden Gase (Ar, CO<sub>2</sub>) pro Gaslinie jeweils zwei Massenflussregler mit unterschiedlichen Arbeitsbereichen verwendet. Einen MFC mit einem Bereich von 1 SLM (Standard Liters per Minute, entsprechend bis zu

60 Nl/h) und einem MFC bis zu 10 SLM (entsprechend 600 Nl/h). Den 10 SLM MFCs ist ein Ventil vorgeschaltet, da die MFCs auch Gas durchlassen, wenn kein Gasfluss eingestellt ist, jedoch Gasdruck anliegt. Die Leckrate beträgt < 5% F.S. (FullScale), entsprechend bis zu 3 Nl/h bei den 1 SLM MFCs und bis zu 30 Nl/h bei den 10 SLM MFCs. Um dennoch eine genaue Gasmischung einstellen zu können, sind diese Ventile nur bei den MFCs geöffnet, die auch einen Gasfluss eingestellt haben. Die Ansteuerung der Ventile erfolgt über die oben schon erwähnte Software mgc647c-dimsrv, die dazu die Befehle an einen Steuercomputer weiterleitet (siehe 5.2.6 und 5.2.2).

Die Steuerung des Massenflusses erfolgt über thermische Messung des Massenflusses. Dazu werden Temperatursensoren vor und nach einem Heizelement montiert. Da die Dichte und die spezifische Wärmekapazität des vorbeiströmenden Gases bekannt ist, kann der Unterschied zwischen dem statischen und fließenden Wärmetransport gemessen werden. Die Temperatur des Gases wird vorher bestimmt und in der Berechnung berücksichtigt. Der schematische Aufbau eines solchen MFC wird in Abbildung 5.2 gezeigt.

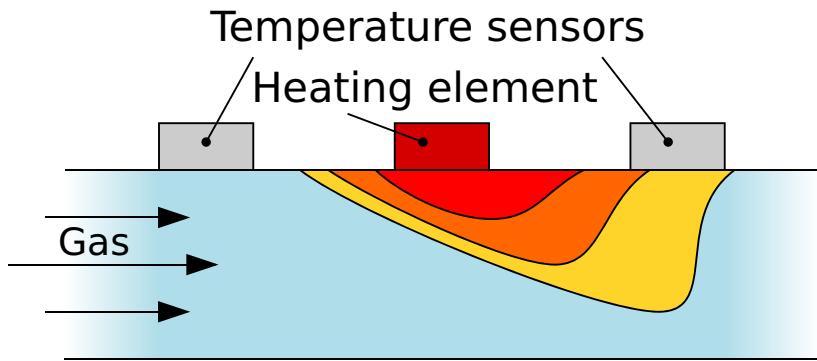


Abbildung 5.2: Schematischer Aufbau eines MFC, die Temperatur an den Sensoren ist von dem Massenfluss des Gases abhängig [18]

Die Genauigkeit der einzelnen MFCs ist den Kalibrationsprotokollen im Anhang zu entnehmen. Sie ist abhängig von der eingestellten Massenflussrate. Der maximale Fehler liegt nach oben hin bei +0.7% und nach unten bei -0.3%.

### 5.2.2 Pressluftventile MFC

Bei den in 5.2.1 angesprochenen Ventilen handelt es sich um Ventile, die über Druckluft geöffnet werden können. Liegt keine Druckluft an, verschließt eine Feder mit einem Kolben den Durchlass. Die Druckluft überwindet die Federkraft und öffnet so den Durchlass. Mit einer Schaltstufe werden handelsübliche 230 V Magnetventile über LV-TTL Pegel (3,3 V) angesteuert.

### 5.2.3 Massenspektrometer

Wie Abbildung 5.1 zeigt, kann sowohl von jeder Gaslinie als auch von dem Rücklauf des Gases aus dem Supermodul eine Probe im Massenspektrometer analysiert werden. Bei dem verwendeten Massenspektrometer handelt es sich um ein sogenanntes Quadrupol-massenspektrometer (QMS) vom Typ Transpector Version 2 H200M der Firma Inficon. Es kann alle Massen bis zu 200 AMU (Atomic Mass Units) messen. Für die Massentrennung wird ein hochfrequentes elektrisches Wechselfeld angelegt. So gelangen nur die Ionen mit eingestelltem Massen-Ladungsverhältnis zum Faraday-Auffänger (Detektor). Alle anderen Ionen haben instabile Flugbahnen. Da die Signale sehr schwach sind, werden sie noch mit einem Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) verstärkt und dann gemessen. Der Vorteil dieser Technik ist, dass Messungen im Millisekundenbereich möglich sind und zudem das Gerät eine hohe Messdynamik aufweist (siehe Datenblatt im Anhang).

Die Parameter eines QMS bestehen aus der angelegten Gleichspannung  $U$  für das elektrische Feld, um die Ionen zum Detektor zu beschleunigen, der angelegten Wechselspannung  $V$  an den Quadrupolen mit der Frequenz  $\omega t$  und dem Radius  $r$  des Quadrupols. Das Massen-Ladungsverhältnis ( $m/z$ ) wird über die Mathieu-Gleichung beschrieben [19].

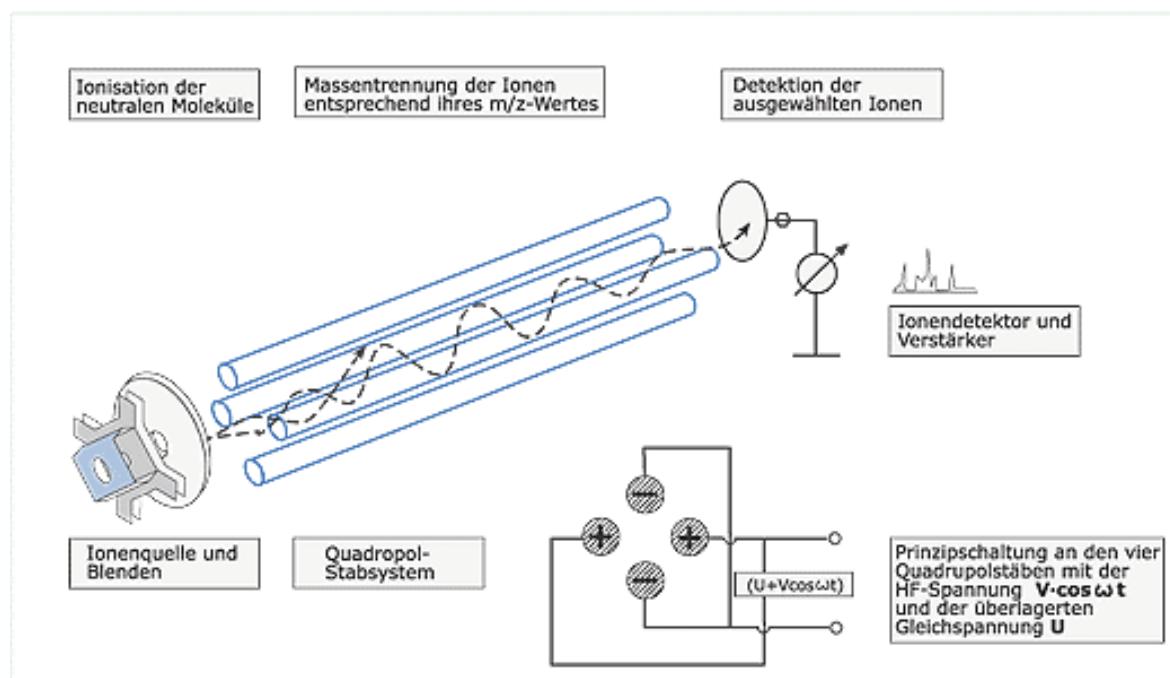


Abbildung 5.3: Schematischer Aufbau eines Quadrupolmassenspektrometers [20]

Bei dem Ionisieren der Gasmoleküle ist darauf zu achten, dass Argon auch zweifach ionisiert werden kann und dann im Massenspektrometer bei  $m/z$  von 20, zusätzlich

zum einfach ionisierten Argon bei 40 nachgewiesen wird. Kohlendioxidionen dissoziieren zusätzlich durch Stoß, so dass nicht nur die einfach und zweifach ionisierten Kohlendioxidmolekülionen zu messen sind ( $\text{CO}_2^+$  bei 44 und  $\text{CO}_2^{++}$  bei 22 AMU), sondern ebenso die Fragmente bei 28 AMU ( $\text{CO}^+$  Kohlenmonoxidmolekülion), und die aus spontanem Zerfall von  $\text{CO}^{++}$  entstehenden Ionen bei 16 AMU (Sauerstoff-Ion) und 12 AMU (Kohlenstoff-Ion). Des Weiteren bildet sich durch Kohlenstoffionen zusammen mit Wasser Alkohol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ), daher muss auch der Peak bei 45 AMU und, falls vorhanden, bei 46 AMU berücksichtigt werden. Mehr zur Dissoziation von Molekülionen durch Stoß findet sich in [21]. Eine Interpretationsliste aller Massen bis 50 AMU wird vom Hersteller zur Verfügung gestellt [22] und ist im Anhang abgedruckt.

Um das Verhältnis zwischen Argon und Kohlendioxid zu bestimmen, wird mit dem Probengas die Vakuumkammer des Massenspektrometers gespült. Dazu wird das Massenspektrometer ausgeschaltet, damit es bei zu hohem Druck keinen Schaden nimmt. Die Lastanzeige der Turbomolekularpumpe (siehe ausgehängte Anleitung am Gassystem), die für das Ultrahochvakuum (UHV) zuständig ist, sollte nicht mehr als 50% Last anzeigen. Nach ein paar Minuten ist sichergestellt, dass der Abzweig zum Massenspektrometer ausreichend gespült ist. Das Nadelventil kann dann wieder zugedreht und das Massenspektrometer gestartet werden. Nun wird das Nadelventil nur so weit aufgedreht, dass ein Druck von ungefähr  $5 \cdot 10^{-7}$  mbar in der Vakuumkammer erreicht wird. Auf dem Windows-PC *pvss02* ist die Monitoringsoftware TWare32 installiert und dieser über die RS-232 Schnittstelle mit dem Massenspektrometer verbunden. Die Bedienung der Software kann dem Handbuch oder der Onlinehilfe entnommen werden. Es werden die Partialdrücke der einzelnen Komponenten angezeigt, die addiert werden müssen: Bei Argon die Partialdrücke von 20 und 40 AMU und bei Kohlendioxid die oben genannten.

Der im Flaschengas enthaltene Sauerstoff kann bei 32 AMU (Sauerstoffmolekül) gemessen werden.

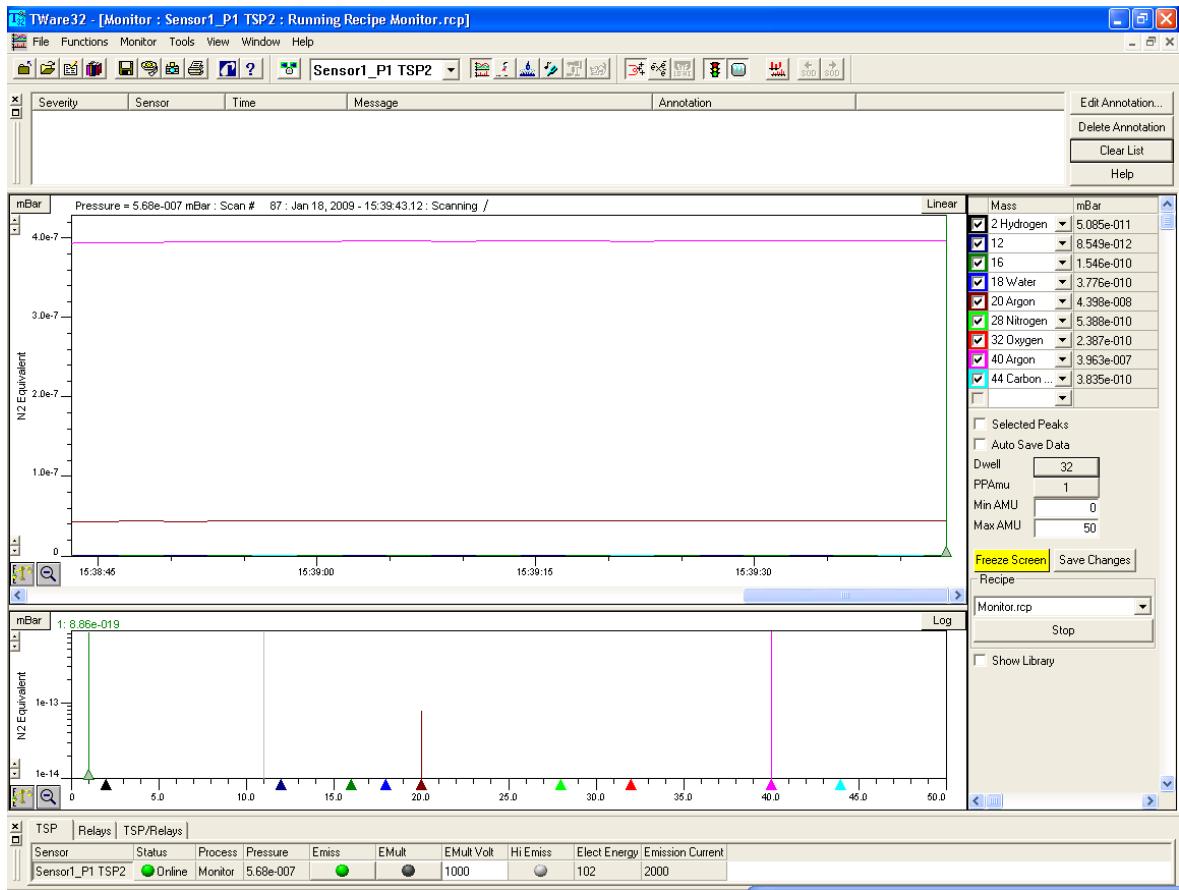


Abbildung 5.4: Screenshot TWare32 Oberfläche: Analyse von Argon, Peaks bei 20 und 40 AMU

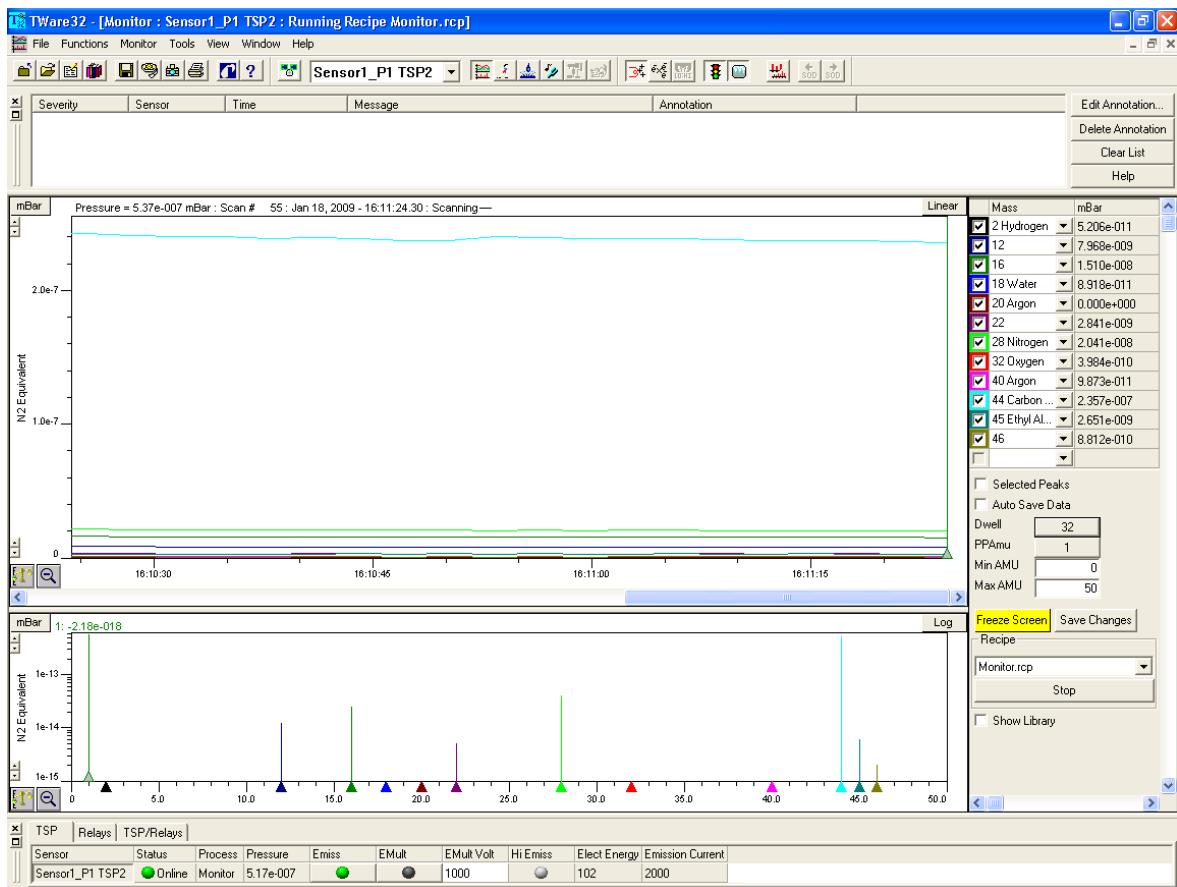


Abbildung 5.5: Schreenshot TWare32 Oberfläche: Analyse von Kohlendioxid, Peaks bei 12, 16, 22, 28, 44, 45 und 46 AMU

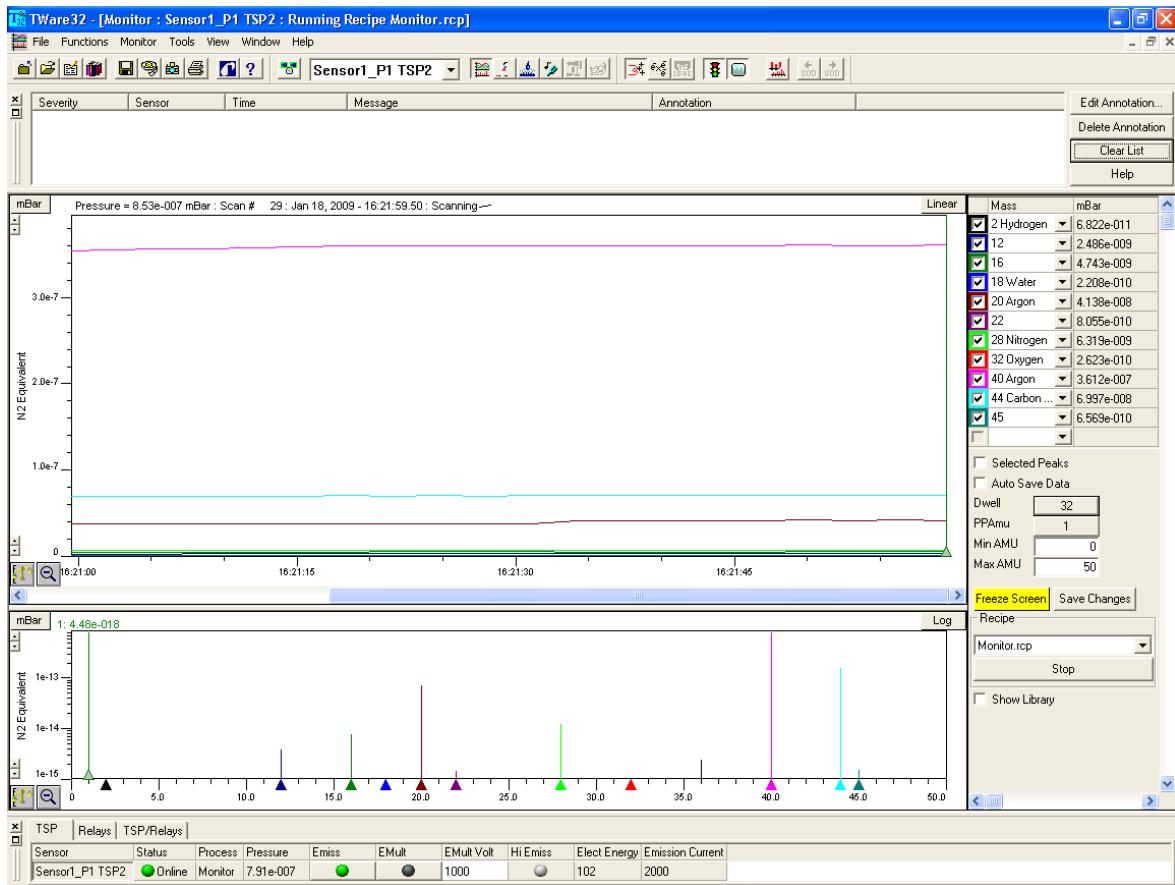


Abbildung 5.6: Schcreenshot TWare32 Oberfläche: Analyse eines 83:17 Gemisches (Ar:CO<sub>2</sub>), Peaks bei 12, 16, 20, 22, 28, 44, 45 AMU

AMU	Partialdruck in mbar
12	$2,486 \cdot 10^{-9}$
16	$4,743 \cdot 10^{-9}$
20	$4,138 \cdot 10^{-8}$
22	$8,055 \cdot 10^{-10}$
28	$6,319 \cdot 10^{-9}$
40	$3,612 \cdot 10^{-7}$
44	$6,997 \cdot 10^{-8}$
45	$6,569 \cdot 10^{-10}$
Summe Ar	$4,0258 \cdot 10^{-7}$
Summe CO <sub>2</sub>	$0,84980 \cdot 10^{-7}$
Anteil Ar	$\approx 82,6\%$
Anteil CO <sub>2</sub>	$\approx 17,4\%$

Abbildung 5.7: Partialdrücke der Abbildung 5.6 aufgelistet, Abweichung der Mischung von 83:17 Verhältnis im Rahmen der Genauigkeit der Massenflussregler

### 5.2.4 Orbisphere 510

Die Orbisphere 510 ist ein Messgerät der Firma Hach Ultra, an welches ein elektro-chemischer Sauerstoffsensor angeschlossen ist. Die Messwerte werden über die RS-485 Schnittstelle durch einen RS-485-zu-RS-232 Wandler an eine serielle Schnittstelle eines Computers gesendet. Auf diesem läuft die Messwerterfassung (siehe Kapitel 5.3.4).

Bei dem Sauerstoffsensor handelt es sich um das Modell 31120S mit der Membran 2956 A (siehe Datenblatt Anhang). Die Genauigkeit beträgt 1% des Ablesewertes oder entspricht dem Minimalwert des Messbereiches, je nachdem welcher der Fehlerwerte größer ist.

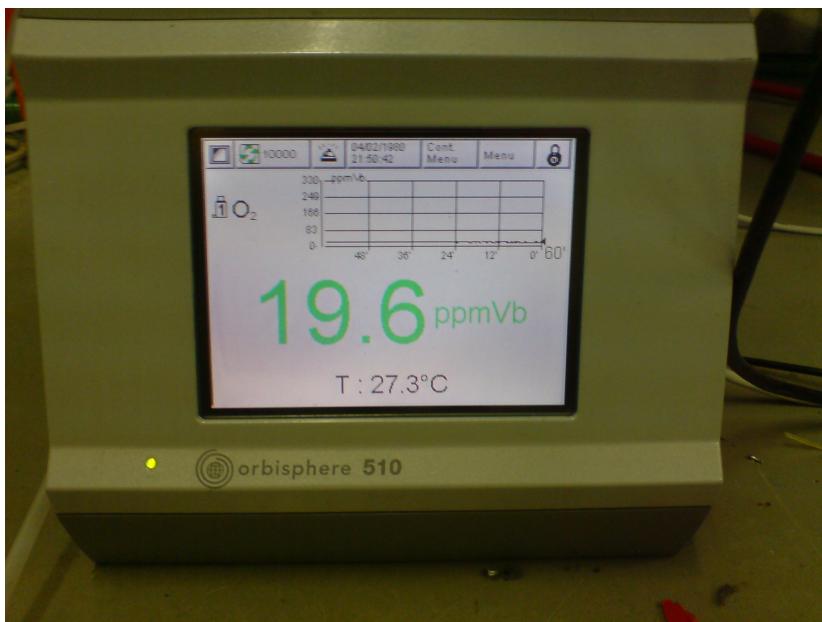


Abbildung 5.8: Orbisphere 510 Messgerät

### 5.2.5 Drucksensoren

#### Drucksensor Gasauslass Supermodul

Hierbei handelt es sich um einen Relativdruckmesser vom Typ CTEM7N010G04 im Bereich von -10 bis +10 mbar. Die Versorgungsspannung liegt bei 9 – 32 V, die Messwerte werden über den Stromfluss übertragen. Dabei entspricht der Messwert -10 mbar einem Stromfluss von 4 mA und +10 mbar entsprechen 20 mA. Diese Übertragungsart ist störungensfällig und es werden nur zwei Adern verwendet. Zur Messwerterfassung siehe Abschnitt 5.2.6. Der Drucksensor hat einen großen Messbereich, der zulässige Maximaldruck in den Kammern beträgt jedoch nur 2 mbar.

Die Messungenauigkeit wird wie folgt bestimmt. Der Drucksensor wird offen der Atmosphäre ausgesetzt, der Differenzdruck beträgt dann Null. Dann wird die Schwankungsbreite über die Zeit vermessen und bestimmt.

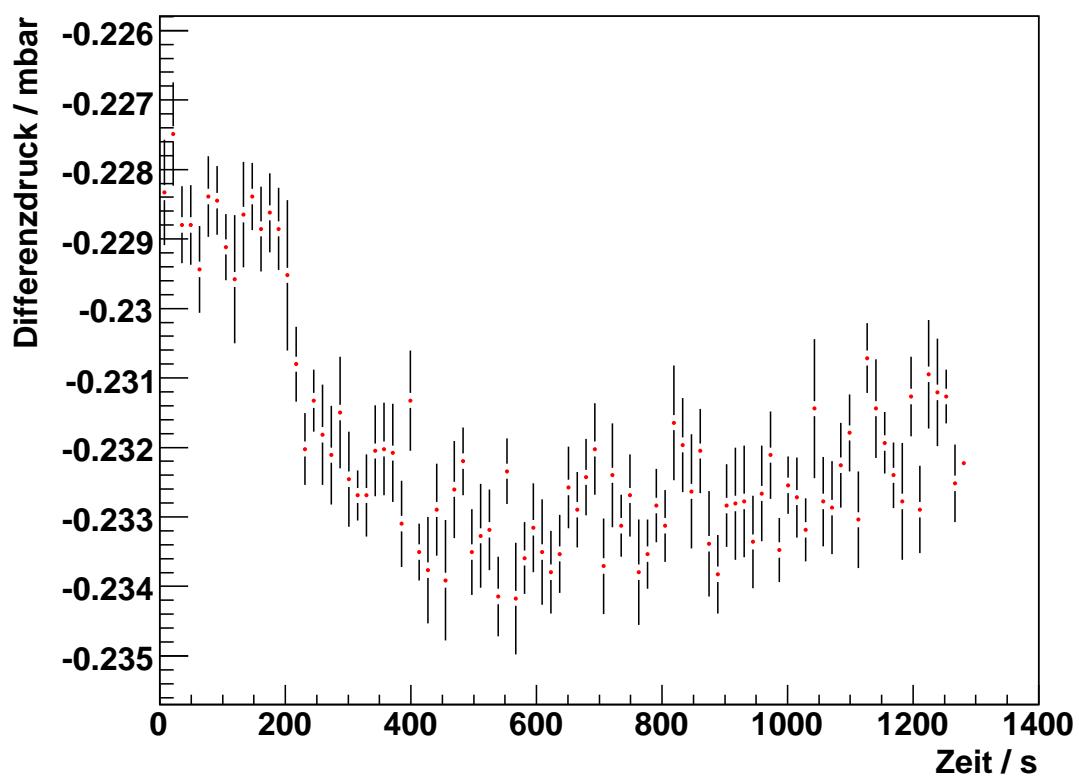


Abbildung 5.9: Schwankungen des Differenzdrucksensors an Atmosphärendruck (Differenzdruck), der Offset ist thermischen Ursprungs und beträgt bei 20°C maximal 0,32 mbar, siehe Datenblatt im Anhang

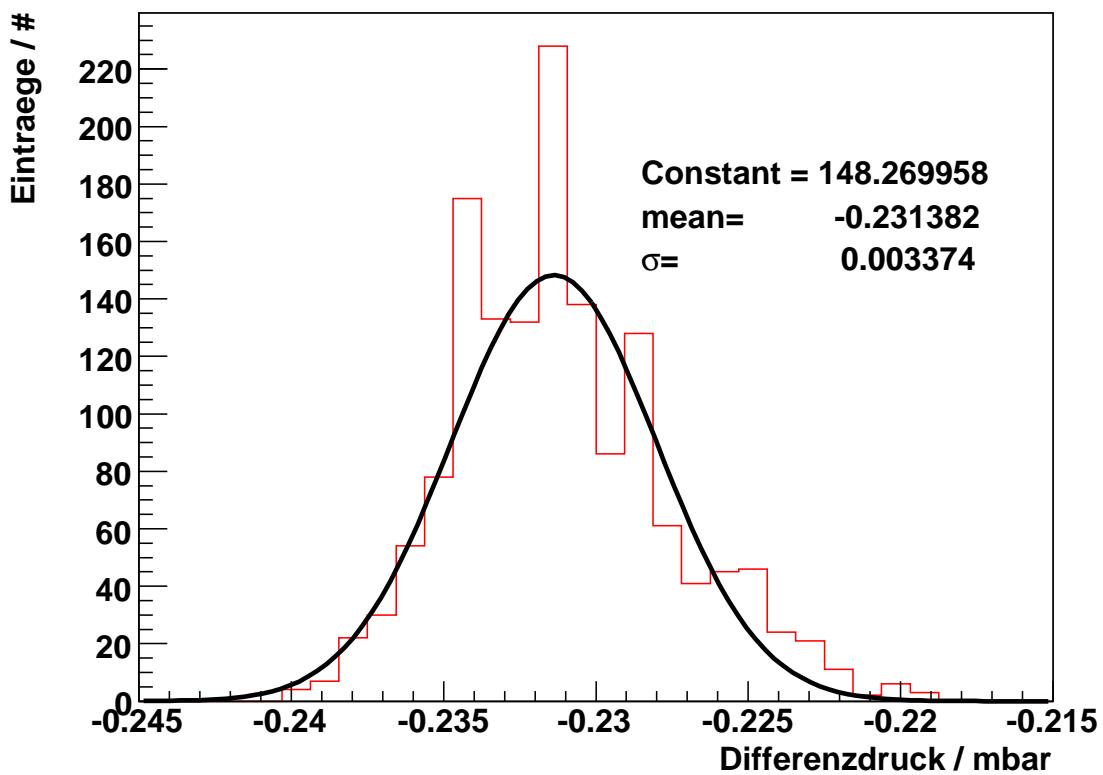


Abbildung 5.10: Fehlerbestimmung des Differenzdrucksensors an Atmosphärendruck (Differenzdruck)

Der Fehler ( $\pm 3\sigma \approx 99,7\%$ ) beträgt somit  $\pm 0,01$  mbar. Der thermische Offset wird in der Meßwertverarbeitung subtrahiert.

### Drucksensoren Flaschendruck

Um den Füllstand der Flaschen im Gaslager abzuschätzen, sind vor den Druckminde-rern Drucksensoren installiert. Diese übertragen ebenfalls den Messbereich von 0 bis 250 bar in Stromwerte zwischen 4 und 20 mA. Es handelt sich bei den Sensoren um den Typ WU-10 250 bar des Herstellers WIKA (Datenblatt siehe Anhang). Bei den Argonflaschen kann anhand des Druckes auf den Füllstand geschlossen werden, da Argon nur in gasförmiger Phase in den Flaschen vorliegt. Das Kohlendioxid ist jedoch in flüssiger Phase vorhanden und der aktuelle Füllstand könnte nur über das Gewicht der Flasche bestimmt werden, ein Wiegen ist allerdings technisch im Flaschenlager nicht möglich. Wenn der Druck im Flascheninneren die Dampfdruckgrenze unterschreitet, liegt ebenfalls die gasförmige Phase vor und nun kann der Füllstand bestimmt werden.

### 5.2.6 Messwerterfassung

Die Messwerterfassung für die analogen Sensoren des Gassystems wird über ein sogenanntes DCS Board realisiert (DCS = Detector Control System). Das DCS Board ist ein kleines Linux embedded System. Der Kern des Systems besteht aus einem EPXA 1 von Altera, ein FPGA mit eingebauten ARM-Prozessor. Des Weiteren verfügt das Board über eine 10 Mbit Netzwerkschnittstelle, 8 MB Flashspeicher und 32 MB Arbeitsspeicher.

Das DCS Board wurde entwickelt, um eine Kammer des TRD zu kontrollieren, d.h. die Spannungsversorgung für die einzelnen ROBs (Read-Out Boards) ein- und auszuschalten und zudem die MCMs zu konfigurieren. Dies geschieht über digitale Ein- und Ausgänge. Die Kommunikation mit dem MCMs wird über ein Bussystem realisiert, dort findet LVDS (Low Voltage Differential Signaling) Verwendung.

Für die für uns wichtige analoge Messwerterfassung wird auf einen 16 bit 8-Kanal-ADC zurückgegriffen. Die verwendeten Drucksensoren im Gassystem und auch am Supermodul entsprechen dem 4 – 20 mA Industriestandard. Damit ist gemeint, dass der Messbereich übersetzt wird in einen Stromfluss zwischen 4 (Messbereichsminimum) und 20 mA (Maximum des Messbereichs des jeweiligen Sensors). Dies hat den Vorteil, dass zum Anschluss nur ein zweiadriges Kabel für Spannungsversorgung und Messwertübertragung vonnöten ist und ebenso diese Übertragungsart sehr störunanfällig ist. Als Versorgungsspannung können 12 – 30 V verwendet werden. Der Strom wird bestimmt über den Spannungsabfall an einem Widerstand.

In Münster wird 13 V als Versorgungsspannung und Messwiderstände von 120 Ohm mit einer geringen Toleranz von einem Prozent verwendet.

Der Messwert für einen Drucksensor berechnet sich dann mit der gemessenen Spannung U in V am Widerstand wie folgt:

$$p = \left( \left( \frac{U}{R} - I_{min} \right) \frac{p_{max} - p_{min}}{I_{max} - I_{min}} + p_{min} \right)$$

Der Messwert für den Differenzdrucksensor (siehe 5.2.5) mit einem Messbereich von -10 bis +10 mbar ergibt sich wie folgt aus der gemessenen Spannung U in V am Widerstand:

$$p(mbar) = U(V) \cdot x + y$$

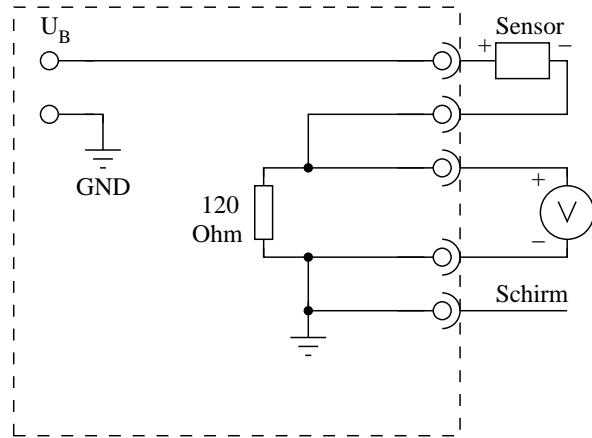


Abbildung 5.11: Systematischer Aufbau der Strommessung über den Spannungsabfall an einem Widerstand

## 5.3 Software

### 5.3.1 Distributed Information Management (DIM)

Die gesamte Messwerterfassung und der Austausch dieser Werte unter den Programmen erfolgt ausschließlich über das Distributed Information Management System (DIM). Dies basiert auf einer Client/Server Topologie.

Server bieten den Clients sogenannte Dienste (engl.: Services) an. Ein Dienst ist dabei ein beliebiger Typ von Daten (Zahl, Text, etc.) mit beliebiger Größe und mit einem Namen als Kennzeichnung. Diese Dienste werden von dem Server bei dem sogenannten Nameserver registriert. Der Nameserver muss dem Client und Server bekannt gegeben werden. Der Client kann nun bei dem Nameserver eine Liste der Dienste des jeweiligen Servers anfordern und dann direkt beim Server den gewünschten Dienst abonnieren. Der Server sendet nun entweder in festen definierten Zeitabständen oder bei Veränderungen des Wertes des entsprechenden Dienstes den Wert an den Client. Ebenso ist es möglich, Befehle von dem Client an den Server zu übertragen.

Für den Fall eines Absturzes (Server oder gar Nameserver) werden alle Clients informiert und verbinden sich erneut automatisch, sobald der betroffene Server wieder gestartet ist [23].

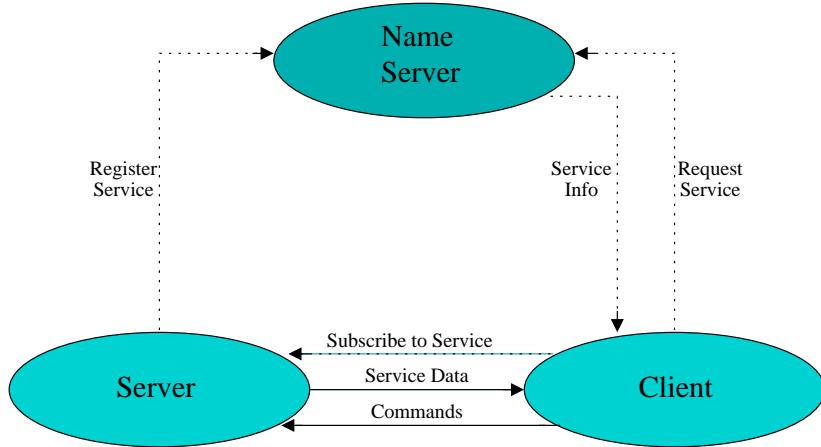


Abbildung 5.12: Komponenten von DIM und ihre Funktion [23]

### 5.3.2 orb510-dimsrv und orb510-logger

Der orb510-dimsrv ist über eine serielle Schnittstelle mit der Orbisphere 510 verbunden und bekommt regelmäßig (alle 5 Sekunden) alle Informationen (Umgebungsdruck, Umgebungstemperatur und gemesse Sauerstoffkonzentration) übermittelt. Diese werden als DIM Dienste zur Verfügung gestellt und von der Software orb510-logger in einer MySQL-Datenbank gespeichert. Um unnötige Informationsübertragung via DIM zu vermeiden, wird Deadbanding angewandt. Dies bedeutet, dass bei einem Messwert eine Mindestabweichung vorhanden sein muss, um eine Aktualisierung des entsprechenden Dienstes anzustoßen. Ansonsten würde unnötigerweise bei sehr ähnlichen Werten immer wieder ein DIM Update angestoßen werden. Die Grenzen liegen aber mit 0,5 ppm für den Sauerstoffmesswert, 0,1 °C für den Temperaturwert und 1 mbar für den Druckwert sehr niedrig - so wird ausgeschlossen, dass nachher in den Messwerten nur große Sprünge zu sehen sind.

### 5.3.3 mgc647c-dimsrv

Der DIM Server mgc647c übernimmt die Ansteuerung der Massenflussregler. Mit dem Kontroller MGC647 Typ C wird über eine serielle Schnittstelle gesprochen. Es werden hierüber genauso die aktuellen Flussmengenwerte erfasst, wie auch neue Flussmengen eingestellt. Als DIM Dienste werden sowohl aktuelle, als auch die eingestellten Flussmengen veröffentlicht. Diese werden dann später, zum Beispiel von der Software smsalerter, weiterverwendet.

Der mgc647c-dimsrv abonniert die Dienste GAS\_ORB510\_PRESSURE (Umgebungsdruck) und GAS\_ORB510\_TEMP (Umgebungstemperatur). Damit werden über das ideale Gasgesetz die vom Benutzer eingestellten Flusswerte (l/h) in Massenflusswerte

umgerechnet. Um die im Kontrollgerät verwendeten Normliter pro Stunde (STP, Normalbedingungen IUPAC 1982: 0 °C und 1000 mbar) zu erhalten, wird der gewünschte Gasfluss noch mit einem Korrekturfaktor multipliziert. Er berechnet sich aus:

$$f_{corr} = \frac{273,15K}{1000mbar} \cdot \frac{p_{Orb510}}{273,15K + T_{Orb510}}$$

Dies wird benötigt um die Berechnung in 6.2 ohne große Umrechnungen durchführen zu können.

Des Weiteren schaltet der mgc647c-dimsrv die Ventile für die jeweilig verwendeten Massenflussregler auf und auch wieder zu (bei Nichtverwendung). Dies geschieht über SSH Befehle an das DCS Board (siehe 5.2.6).

### 5.3.4 orb510-viewer

Das Programm orb510-viewer hat zur Aufgabe dem Benutzer Informationen über die bei den Gastests gesammelten Daten zu geben. Für einen angegebenen Zeitraum werden Flussraten, der Relativdruck zur Umgebung am Orbisphere-Sensor und die gemessene Sauerstoffkonzentration der Orbisphere grafisch angezeigt.

Zur Benutzung:

```
orb510-viewer ["2008-10-12 14:53:00"] ["2008-10-18 17:00:00"]
```

Wird das Programm ohne Parameter gestartet, werden automatisch die letzten 24 Stunden angezeigt. Wird das Programm mit einem Parameter gestartet, werden von diesem Datum an bis zum aktuellen Zeitpunkt alle verfügbaren Informationen angezeigt. Wird das Programm mit zwei Parametern gestartet, werden zwischen diesen Datumsangaben alle Daten angezeigt. Das Programm greift auf ROOT Bibliotheken zurück und wird in einem sogenannten Interaktivmodus gestartet. Dadurch behält der Benutzer die Möglichkeit, in Histogramme zu zoomen und die gezeigten Plots abzuspeichern und zu exportieren.

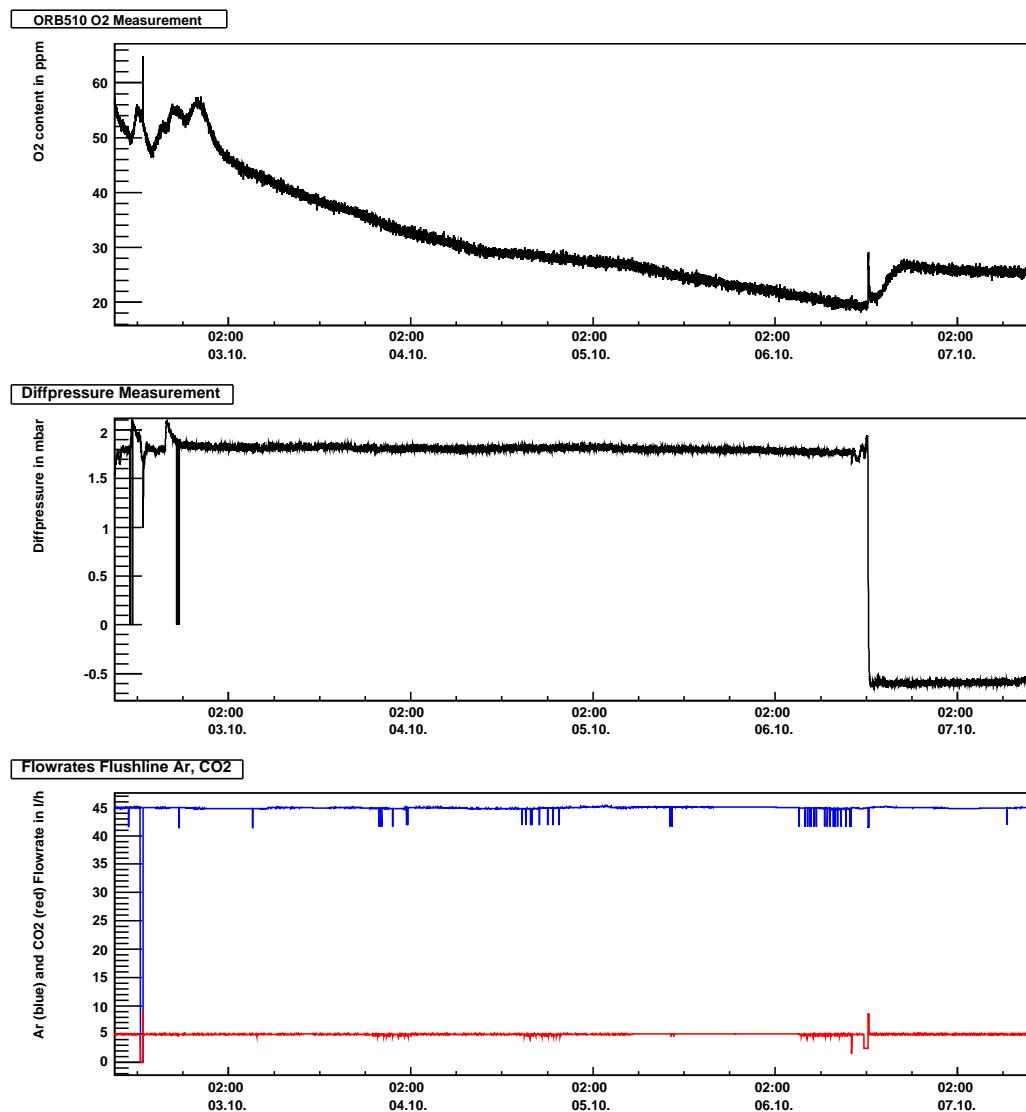


Abbildung 5.13: Benutzeroberfläche der Software: oben Sauerstoffkonzentration, mitte Differenzdruck, unten Flussraten für angegebene Zeitraum

### 5.3.5 smsalerter

Das Programm smsalerter besteht aus zwei Komponenten: das Programm selbst, welches die DIM Dienste, den Flaschendruck und die Flussraten des Gassystems zur Verfügung stellen, abonniert und einem Shellscript, welches die Alarmierung übernimmt.

Im Programm sind die benötigten DIM Dienste fest eingestellt - diese werden alle 15 Sekunden überprüft. Werden zu große Abweichungen zwischen Soll- und Istflussmengen festgestellt oder sinkt der Druck einer Flasche auf 2 bar, wird Alarm ausgelöst. Eine den Umständen entsprechende Nachricht wird durch das Shellscript an einen SMS Provider

übermittelt. Um die Empfänger der SMS leichter ändern zu können, werden diese im Shellscript eingetragen. Nachdem eine Gasflasche gewechselt worden ist, wird ebenfalls eine SMS versendet. So sind die anderen Empfänger der vorhergehenden Alarm-SMS bezüglich der leeren Gasflasche über den Flaschenwechsel informiert.

### 5.3.6 adcserver

Der adcserver DIM Server läuft auf dem DCS Board. Seine Aufgabe besteht darin, die ADC Kanäle abzufragen, die gemessenen Spannungen (siehe 5.2.6) umzurechnen (je nachdem, welcher Sensor angeschlossen ist) und über DIM Dienste zur Verfügung zu stellen.

### 5.3.7 vreg

Das Tool vreg steuert die digitalen Ausgänge des DCS Boards an, um damit die Ventile der Massenflussregler zu öffnen oder zu schließen. Es muss auf dem DCS Board ausgeführt werden. Die Syntax lautet:

```
vreg [IO-Port] [0/1]
```

IO-Port	1	2	3	4
Ventil 10 SLM MFC	CO <sub>2</sub> Flushline	CO <sub>2</sub> Mixline	Ar Mixline	Ar Flushline

Abbildung 5.14: Belegung der digitalen Ausgänge des DCS Boards

## 5.4 Betrieb

Zur Überprüfung des Systems wurde die Gasmischung Argon 83% und Kohlendioxid 17% fest eingestellt. Es wurden Daten von kosmischer Höhenstrahlung genommen und die Driftplateaus vermessen. Die Ablesegenauigkeit der Driftzeit liegt bei  $\pm 1$  Zeitbin. Aus der gemessenen Driftzeit von  $(1,5 \pm 0,1) \mu\text{s}$  über die 3 cm Driftvolumen ergab sich eine Driftgeschwindigkeit von  $(2,0 \pm 0,1) \text{ cm}/\mu\text{s}$ .

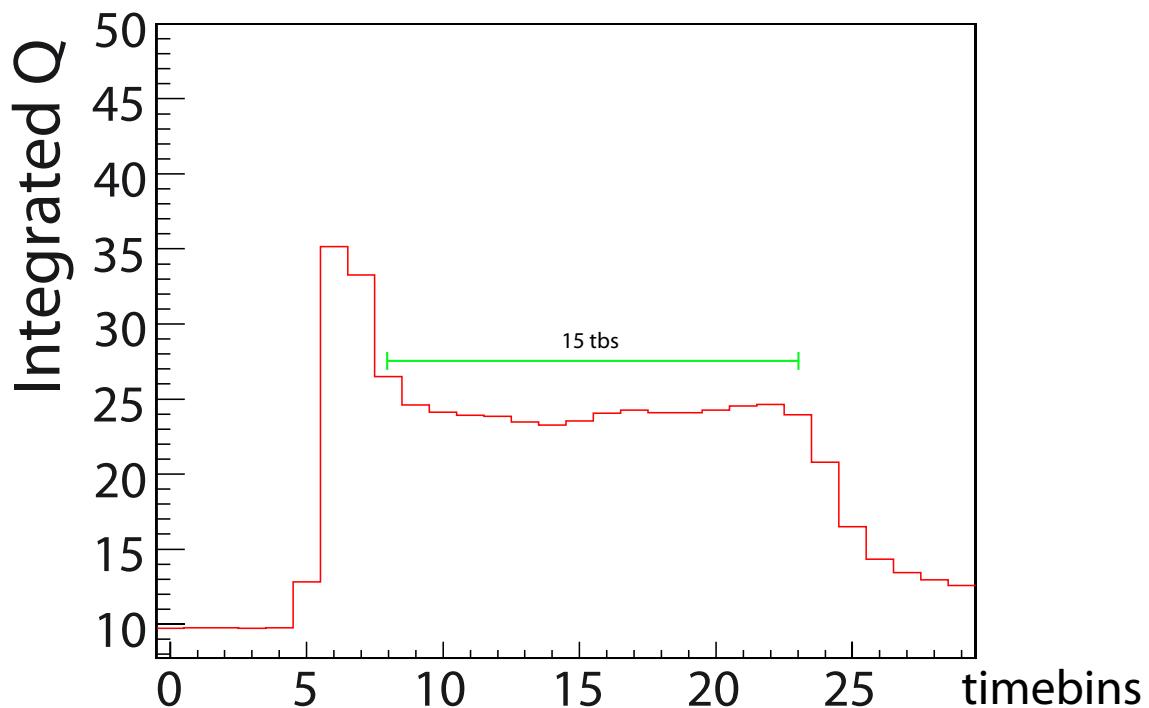


Abbildung 5.15: Pulshöhenplot mit eingezeichnetem Driftplateau, die Driftzeit liegt bei  $1,5 \mu\text{s}$

Die Magboltzsimulation gibt die Driftgeschwindigkeit als Funktion der angelegten Driftspannung für verschiedene Gasmischungen wieder. Der erwartete Wert der Driftgeschwindigkeit für die Driftspannung von 1350 V, die einer Feldstärke von 450 V/cm entspricht, ist eingezeichnet.

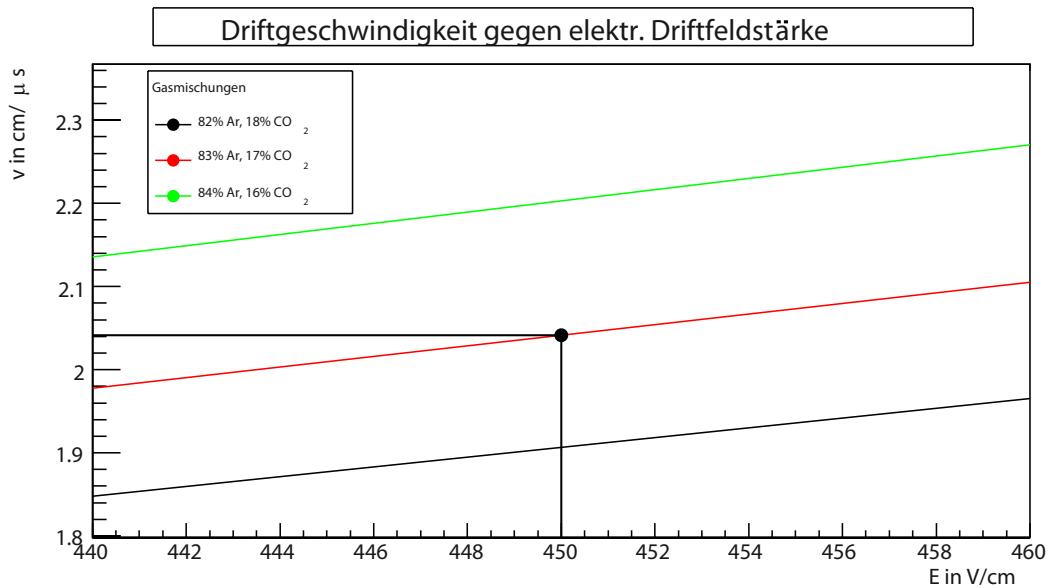


Abbildung 5.16: Magboltzsimulation der Driftgeschwindigkeit dreier Gasmischungen für die Feldstärke von  $450 \text{ V}/\text{cm}$

Die Driftgeschwindigkeit der Magboltzsimulation für  $E = 450 \text{ V}/\text{cm}$  und die Gasmischung Argon 83% und Kohlendioxid 17% liegt bei  $2.05 \text{ cm}/\mu\text{s}$ . Innerhalb der Toleranz wird die aus den Daten bestimmte Driftgeschwindigkeit damit durch die Simulation bestätigt. Durch die Toleranz der Driftgeschwindigkeit ist es möglich, dass die Gasmischung um einen halben Prozentpunkt abweicht. Dies wird von der Messung der Mischung mit dem Massenspektrometer bestätigt (siehe Tabelle 5.7).

# 6 Gastests

## 6.1 Problematik

Der TRD am CERN wird mit einer Xenon / CO<sub>2</sub> Mischung mit leichtem Überdruck betrieben. Da Xenon ein sehr teures Edelgas ist, gilt es, einen möglichen Verlust auf erträgliche Werte zu minimieren.

Es wurde während des Testbeams am CERN Ende 2007 festgestellt, dass eine große Menge an Xenon verloren ging. Dies lag daran, dass die Gasmischung mit leichtem Überdruck durch die nicht gasdichten Kammern gespült wurde. Beim Zusammenbau der Kammern gibt es kritische Punkte, die zum Teil nicht anders bautechnisch lösbar sind.

In den folgenden Untersuchungen wurde festgestellt, dass die sogenannte Padplane nicht vollkommen gasdicht ist, da es fertigungstechnisch nicht möglich ist, die Padplane aus einem Stück zu fertigen. Sie besteht aus drei Teilstücken, die auf dem Foto 6.1 zu erkennen sind.



Abbildung 6.1: Zusammengeklebte Padplane für eine Kammer des TRD

Nicht nur die Nahtstellen sind problematisch. Auf der Unterseite der Padplane sind Kupferpads aufgebracht, die die Ladung der ionisierten Gasmoleküle auffängt. Um nun

eine Verbindung zu der Elektronik auf der Oberseite der Kammer herzustellen, sind kleine Löcher gebohrt worden, um eine Durchkontaktierung zu ermöglichen.

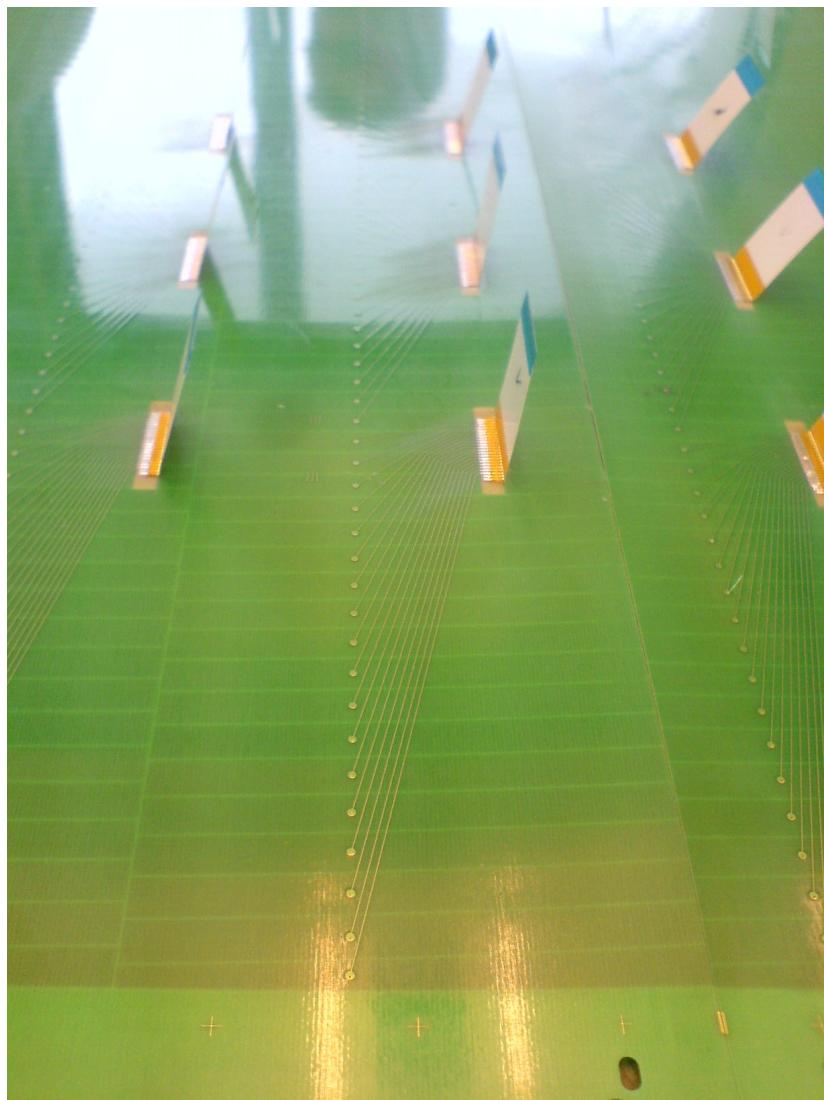


Abbildung 6.2: Nahstelle und Durchkontaktierungen der Padplane

Diese Nahtstellen, sowie die Durchkontaktierungen von den Pads auf der Unterseite zu den MCM Konnektoren auf der Oberseite stellen somit eine Verbindung zwischen dem Gasvolumen der Kammer und dem über der Padplane liegenden Volumen her, falls sie nicht ordnungsgemäß verklebt worden sind.

Über der Padplane liegt eine dünne Schicht (ca. 1 mm) einer wabenförmigen Struktur aus fester Pappe. Dann folgt nach einer Lage Karbonfaser wieder eine gut 2 cm dicke, wabenförmige Struktur, die der Kammer die notwendige Stabilität verleiht und zum Abschluss erneut eine Lage Karbonfaser. Auf diese letzte Schicht wird dann die Ausleseelektronik (Readout Boards = ROBs) montiert.

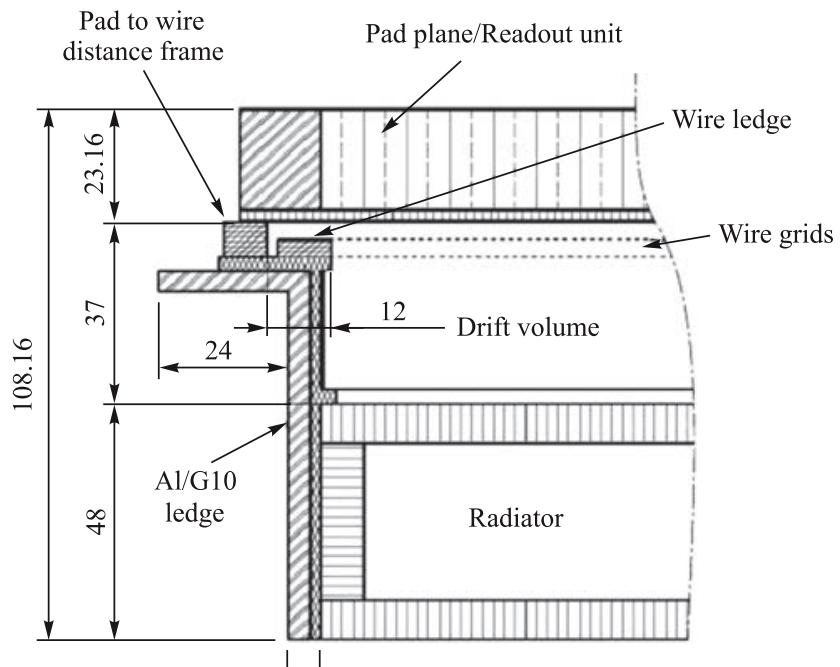


Abbildung 6.3: Querschnitt durch eine TRD Kammer

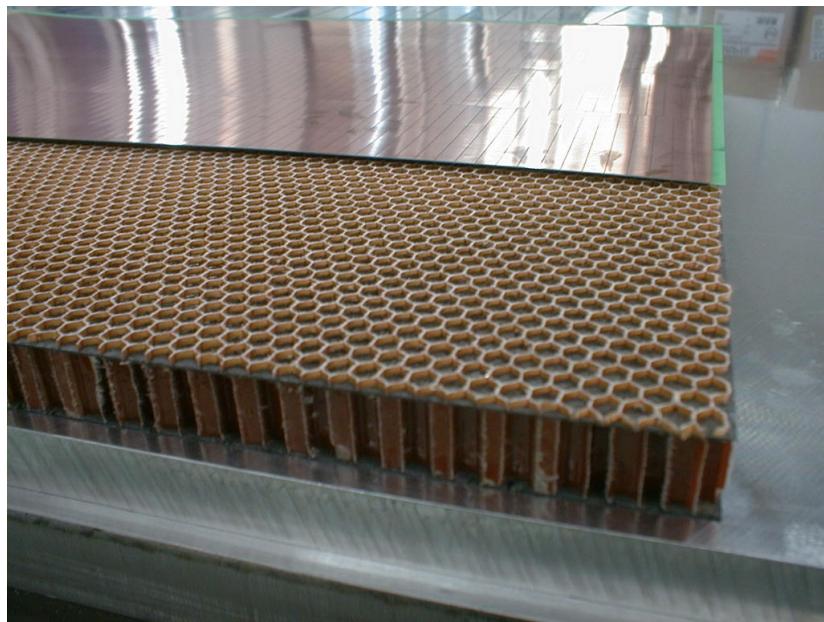


Abbildung 6.4: Die obersten Schichten einer Kammer auf dem Kopf [24]

Die erste ca. 1 mm dünne Wabenstruktur nach der Padplane ist normalerweise mit der folgenden Karbonfaserlage versiegelt. Da durch die Karbonfaserlagen noch die Signalkabel zur Ausleseelektronik durchgeführt werden müssen, wurden diese Flachbandkabel mit einem Kleber vergossen, um die Aussparungen in der Karbonfaserlage zu versie-

geln. Allerdings wurden bei Kontrollen Luftblasen in den Versiegelungen entdeckt, die beim Kleben entstanden sind und einen Luftkanal bilden können. Unter diesen Gegebenheiten ist durch die wabenförmige Struktur ein Luftaustausch möglich.



Abbildung 6.5: Luftblasen, die beim Aushärten des Klebers entstanden sind und eine Verbindung mit dem Gasvolumen der Kammer herstellen können

Daher wurden in einer aufwändigen Reparatur alle Kammern, auch die bereits verbauten, auf Gasdichtigkeit geprüft. Die Aussparungen in der Karbonfaserschicht auf der Oberseite der Kammern wurde genauestens inspiziert und gegebenenfalls mit Epoxidharz versiegelt, wenn die oben angesprochenen Luftblasen zu sehen waren.

## 6.2 Bestimmung der Gasdichtheit

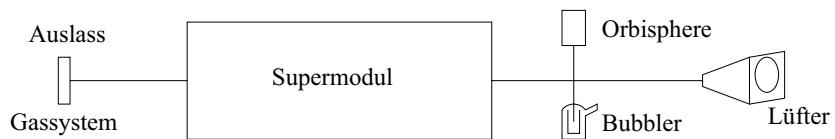


Abbildung 6.6: Schematischer Aufbau zur Bestimmung der Gasdichtheit

Um die Wirksamkeit der in 6.1 beschriebenen Reparatur zu überprüfen, wurden alle Kammern einer Dichtigkeitsmessung unterzogen. Zur Bestimmung der Gasdichtheit einer Kammer sind zunächst einige Überlegungen notwendig.

Von Interesse ist der Gasverlust pro Zeit in Abhängigkeit von der Druckdifferenz zwischen Kammer und Umgebung. Der Gasverlust wird in Normlitern (Nl) pro Stunde angegeben, er entspricht einer Stoffmenge: 1 l eines idealen Gases bei Normalbedingungen. Ein Mol eines Gases nimmt bei Normalbedingungen (0 °C und 1000 mbar) ein Volumen von 22,7 l ein (molares Normvolumen) welches bei deutschen Normalbedingungen (DIN 1343) 22,4 l beträgt. Hier gilt es darauf zu achten, verschiedene Definitionen nicht zu verwechseln:

Bezeichnung	Temperatur	Druck	Literatur
Normalbedingungen (DIN 1343, 1990)	0 °C	1013,25 mbar	
Normalbedingungen (IUPAC 1982)	0 °C	1000 mbar	STP
Standardbedingungen	25 °C	1013,25 mbar	NTP

Im Gegensatz zu den Normalbedingungen sind die Standardbedingungen nicht weltweit verbindlich. Die oben angegebenen Werte für Standardbedingungen gelten für Europa. Im weiteren Verlauf finden ausschließlich die Normalbedingungen der IUPAC (STP) Verwendung.

Um die Gasdichtheit einer Kammer beurteilen zu können, wird die sogenannte "Leak conductance", also der sogenannte Leckleitwert einer Kammer berechnet:

$$L = \frac{c_{Luft} \cdot \Phi \cdot p_{env}}{p_{diff}} (1)$$

Dabei ist  $c_{Luft}$  der Anteil an Luft, die bei Unterdruck durch Lecks in die Kammer strömt. Sie kann durch die Messung der Sauerstoffkonzentration im Gas bestimmt werden. Dazu wird der Sauerstoffanteil mit fünf multipliziert, da die Sauerstoffkonzentration in der Luft bei 20% liegt.

Mit dem Produkt

$$\Phi \cdot p_{env} (2)$$

wird die Stoffmenge an Gas berechnet, das in die Kammer eingelassen wird. Wird noch zusätzlich (2) mit  $c_{Luft}$  multipliziert, erhält man die Stoffmenge der Luft, die in die Kammer eingedrungen ist. Um den Leckleitwert zu bestimmen muss diese Gasmenge nun noch durch den Differenzdruck  $p_{diff}$  dividiert werden, der das Gas durch das Leck in die Kammer drückt, und man erhält (1).

Natürlich sollte der Leckleitwert so gering wie möglich sein, damit die finanziellen Verluste sich im Rahmen halten. Als oberes Limit ist 90 l/h pro Supermodul vorgesehen - die Messungen zeigen allerdings, dass wesentlich bessere Werte die Regel sind.

## 6.3 Durchführung

Es wird in der Regel immer die zuletzt installierte Lage getestet. Dazu verwendet man die Flushline des Gassystems. Die bereits installierten Lagen werden an die Mixline des Gassystems angeschlossen, um deren Betrieb zu ermöglichen.

Als erstes muss die Verbindung mit dem Gassystem hergestellt werden. Dazu verbindet man den Y-Gasadapter der Flushline auf der LV Seite mit der neu installierten Lage.



Abbildung 6.7: Gassystem Flushline Y-Adapter

Es muss sicher gestellt werden, dass auf der anderen Seite der Lage, am Auslass, keine Klebestreifen über den Gasverbindern sind oder Stopfen den Gasauslass verhindern, um Beschädigungen der Kammern durch übermäßigen Überdruck zu vermeiden.



Abbildung 6.8: Gasverbinder am Auslass: richtig und falsch

Nun wird der Gasfluss auf 200 l/h CO<sub>2</sub> eingestellt. Der Austausch des in den Kammern der Lage enthaltenen Gases mit dem einströmenden, kann als exponentieller Vorgang beschrieben werden. Die sogenannte Zeitkonstante  $\tau$  gibt die Zeitdauer an, die benötigt wird, um auf 1/e ( $\approx 37\%$ ) des Anfangszustandes abzusinken. Dies bedeutet,  $\approx 63\%$  des Volumens wurden ausgetauscht. Um eine ordentliche Mischung in der Lage zu erhalten sollte man  $5 \cdot \tau$  ( $\approx 99.3\%$ ) warten. Bei Volumen zwischen 196 l (Lage 0) und 283 l (Lage 5), siehe Tabelle 6.19, und den eingestellten 200 l/h beträgt die Wartezeit zwischen 5 und 7 h. Nachdem diese Zeit verstrichen ist, stellt man den Gasfluss auf 50 l/h CO<sub>2</sub> ein. Erst danach wird das Orbisphere-Setup an den Gasauslass der Lage auf der HV-Seite angeschlossen.

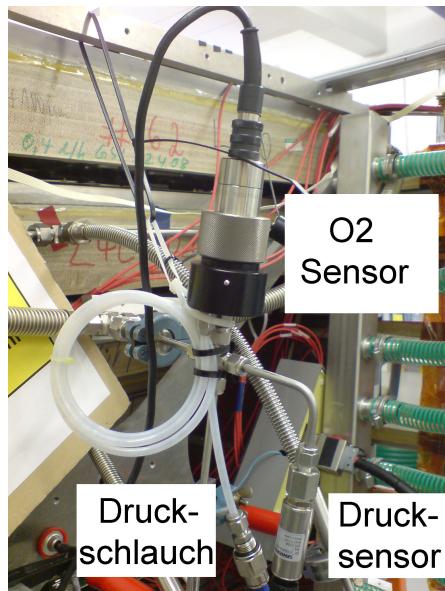


Abbildung 6.9: Bei der Installation des Orbisphere-Setup ist darauf zu achten, dass der Sauerstoffsensor senkrecht steht.

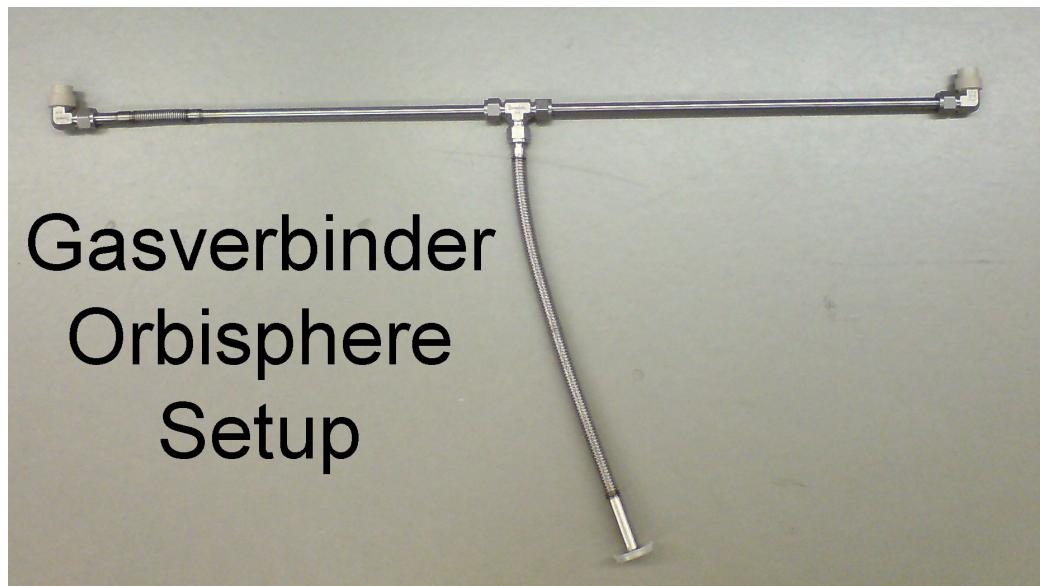


Abbildung 6.10: An dem Auslass der zu überprüfenden Lage wird mit dem oben abgebildeten Gasverbinder eine Verbindung zwischen der Kammer und dem Orbisphere-Setup hergestellt.

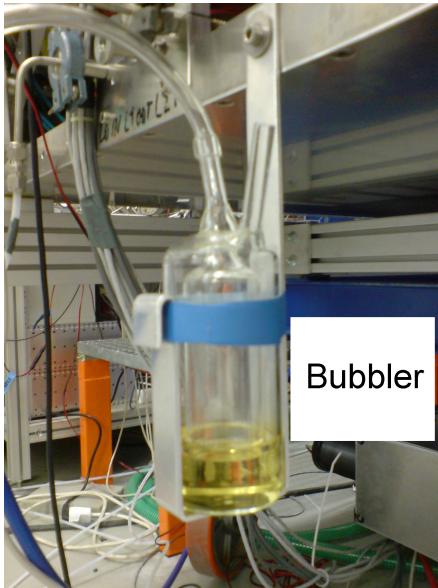


Abbildung 6.11: Der am Orbisphere-Setup angebrachte Bubbler sorgt dafür, dass sich kein zu hoher Unter- oder Überdruck aufbauen kann. Es wird ein Öl mit sehr geringem Dampfdruck verwendet, da es ansonsten bei Unterdruck verdampfen und die Orbisphere verschmutzen könnte.

Es baut sich nun ein leichter Gasüberdruck in der Lage auf. Dies kann man direkt am Bubbler beobachten. Sollten Blasen durch das Öl aufsteigen, so ist der Druck in der Lage mit 2 mbar sehr hoch (auf diesen Wert ist der Bubbler bedingt durch die Füllstandshöhe eingestellt). Die mit dem Drucksensor erfassten Werte werden in einer Datenbank gespeichert und können bequem im Monitoringprogramm smmon oder aber mit dem orb510-viewer betrachtet werden.

Die Lage muss jetzt solange mit CO<sub>2</sub> gespült werden, bis die Orbisphere ein stabiles, niedriges Sauerstoffniveau anzeigt. Der Restsauerstoffanteil im Flaschengas beträgt bis zu 10 ppm. Falls die Werte höher liegen aber stabil sind, bietet es sich an, entweder die Orbisphere noch einmal an Luft zu kalibrieren oder eine temporäre direkte Verbindung zum Flaschengas (Auslass am Gassystem) herzustellen, um die Funktionsfähigkeit der Orbisphere zu überprüfen. Im letzten Fall MUSS die Anzeige der Orbisphere auf < 10 ppm sinken! Höhere Sauerstoffwerte in der Lage (trotz leichtem Überdruck) sind darauf zurückzuführen, dass Restluft sich in den Kammern mit dem Spülgas vermischt und über einen langen Zeitraum einen mitunter großen Beitrag zum Sauerstoffmesswert leistet.

Wenn das stabile Niveau erreicht ist, wird der Ausgang des Orbisphere-Setup für einige Minuten verschlossen. Das sorgt dafür, dass das Gas nun unter Blasenbildung zwangsläufig über den Bubbler entweicht. Gerade dies ist aber für den folgenden Unterdrucktest sehr wichtig, da durch den Unterdruck auch Gas aus dem Schlauch zum Bubbler mit in die Orbisphere gelangt und man daher sicherstellen möchte, dass dieses Gas keinen Sauerstoff beinhaltet, der die Messung (zumindest für einige Zeit) verfälscht. Nach

1 – 2 Minuten ist das geringe Volumen (ca. 0,5 l) des Bubblers hinreichend gespült. Nun wird der blaue Druckschlauch an das Orbisphere-Setup angeschlossen.



Abbildung 6.12: Bevor der Unterdrucktest durchgeführt wird, muss der blaue Druckschlauch an das Orbisphere-Setup angeschlossen werden, da der Lüfter ansonsten keinen Unterdruck in der Lage erzeugen kann.



Abbildung 6.13: Der Diagonallüfter in der Box erzeugt einen Unterdruck im blauen Druckschlauch.



Abbildung 6.14: Das Netzteil rechts neben dem Lüfter wird nun so eingestellt, dass ein Unterdruck von ca. 1 mbar in der Lage erzeugt wird.

Luft dringt nun über gegebenenfalls vorhandene Lecks in die Kammern der Lage ein und wird mit dem Spülgas zur Orbisphere transportiert. Über den gemessenen Sauerstoffanteil im Gas kann berechnet werden, wieviel Luft eindringt und wie hoch der Leckleitwert ist, der von Interesse ist. Es muss mindestens so lange gewartet werden, wie das Gas von der hintersten Kammer der Lage bis nach vorne zur Orbisphere benötigt. Dies dauert bei dem eingestellten Fluss von 50 l/h und je nach Gasvolumina der Kammer bis zu sechs Stunden. Es sollte sich dann ein stabiles Sauerstoffniveau gebildet haben. Die Differenz zum Sauerstoffwert des Überdrucktestes ist beim Unterdrucktest der gesuchte Wert, der den Anteil an Sauerstoff angibt, der nun durch Lecks eingedrungen ist.

Sollten der errechnete Wert für den Gesamtleckwiderstand der Lage im Rahmen des erwarteten liegen (der Wert für den Leckleitwert ist auf jeder Kammer notiert), ist der Test hiermit abgeschlossen. Falls der Wert weit überhalb der erlaubten Summe liegt, gilt es, die Gasverbinder zwischen den Kammern zu überprüfen - ggf. sind sie leicht verkantet und der Dichtring in den Kammern erfüllt nicht seinen Zweck. Ebenfalls kann es sein, dass Gastaschen in den Kammern vorhanden sind, die sich nur langsam ausspülen lassen (hohe Zeitkonstante). Durch Ändern des Druckes („Chamber Breathing“) innerhalb der Kammern/Lage kann eine Vermischung und damit der Abtransport von Gasen beschleunigt werden. Die Druckschwankungen können vielfältig erzeugt werden:

- durch Ein- und Ausschalten der Elektronik, der Betrieb generiert Wärme (die nicht vollständig von der Wasserkühlung abtransportiert wird)
- durch Verändern des Gasflusses bei fester Lüftereinstellung
- durch Verändern der Lüftereinstellung bei festem Gasfluss

Die ersten beiden Möglichkeiten sind bequemer durchführbar, da sie fernsteuerbar über SSH sind.

Ein Beispiel für eine von Ab- und Anschalten von Elektronik generierte Druckschwankung ist unten gezeigt. Man kann gut sehen, wie der Sauerstoffgehalt im Gas nach den Druckschwankungen schlagartig um einen gewissen Wert abfällt.

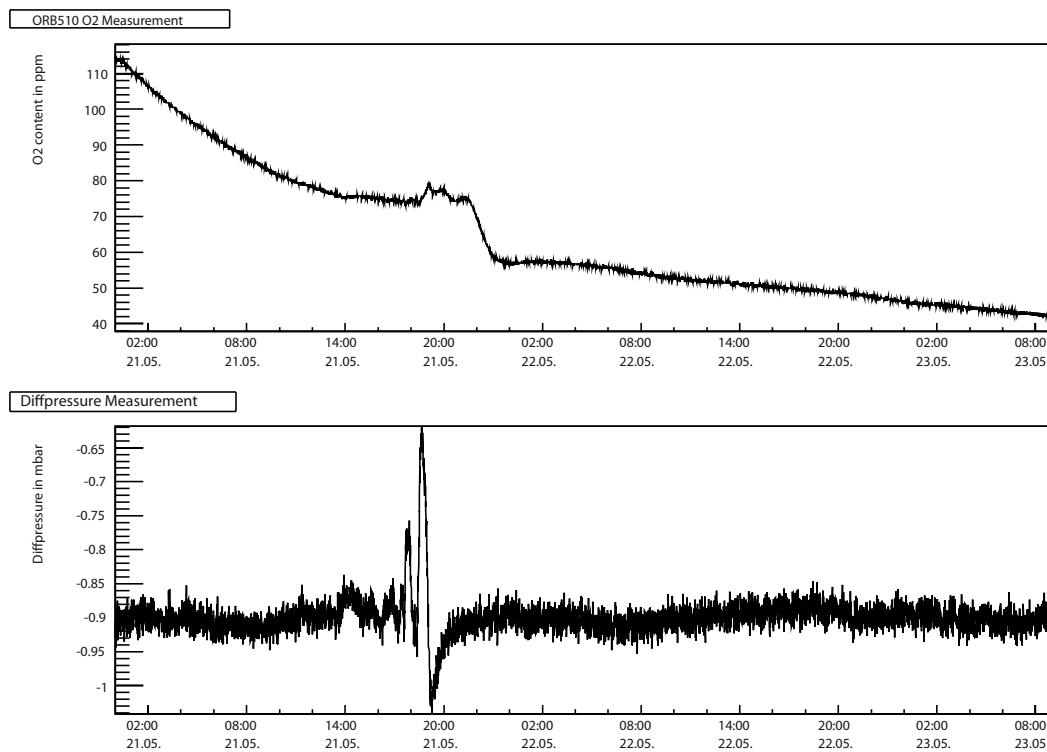


Abbildung 6.15: Chamber Breathing: Hier kann man den plötzlichen Abfall der Sauerstoffkonzentration mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung (abhängig von der Position der Kammer in der Lage) von den Druckschwankungen sehen.

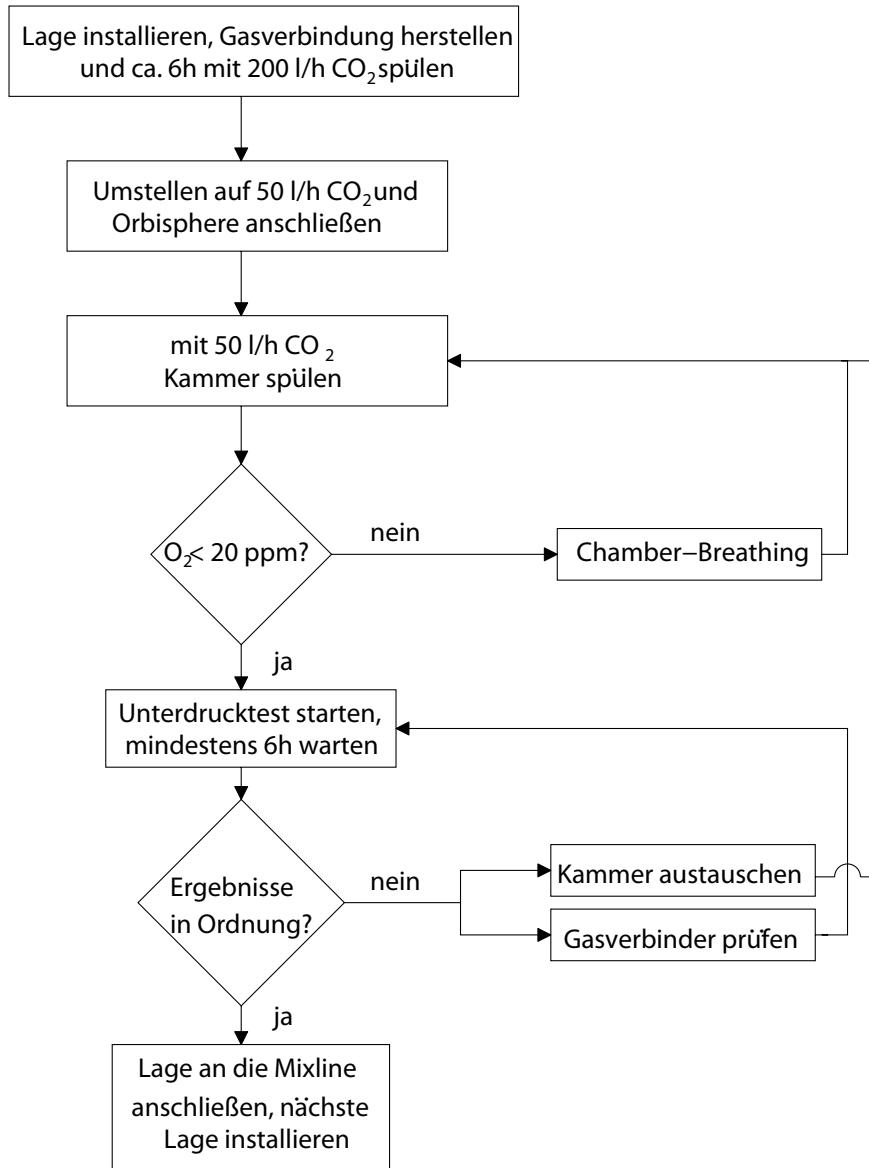


Abbildung 6.16: Die Durchführung des Gastestes im Flussdiagramm

## 6.4 Ergebnisse

Alle Messwerte, den Gastest betreffend werden in einer zentralen Datenbank gesammelt und können mit der bereits erwähnten Software orb510-viewer eingesehen werden.

Im Folgenden ist exemplarisch eine Übersicht mit durchgeführten Tests für das Supermodul III (Rebuild) abgebildet. Es werden die auf den Kammern notierten Leckwiderstände pro Lage aufsummiert und mit den bei den Tests erhaltenen Werten verglichen. Da immer zwei installierten Lagen nachher miteinander verbunden werden

(damit Gasein- und -auslass auf der selben Seite liegen), wurden ebenfalls Tests mit Doppellagen durchgeführt, um die Ergebnisse zu festigen.

In den Tabellen ist der Leckwiderstand (engl. leak conductance) durch 'LC' abgekürzt.  
 SLT = Single Layer Test = Gastest, wie im vorherigen Kapitel beschrieben.

DLT = Dual Layer Test = Zwei installierte, miteinander verbundene Lagen, Test wie SLT.

**SM-III Rebuild Single Layer Tests**

Lage	Flow in Nl/h	Gas	$O_2$ in ppm	rel. p in mbar	LC in 1/h	GSI LC in 1/h
0	50	Ar	73	-1.20	15.2	12.9
1	50	CO <sub>2</sub>	21.5	-0.85	6.3	6.6
2	50	CO <sub>2</sub>	8	-0.90	2.2	3.7
3	50	CO <sub>2</sub>	19	-0.80	5.9	9.6
4	50	CO <sub>2</sub>	19	-0.85	5.6	9.5
6	50	CO <sub>2</sub>	43	-0.90	11.9	4.0

Der letzte SLT war am 23.05.2008, die DLTs wurden vom 10.-12.6.2008 durchgeführt.

**SM-III Rebuild Dual Layer Tests**

Lage	Flow in Nl/h	Gas	$O_2$ in ppm	rel. p in mbar	LC in 1/h	GSI LC in 1/h
0+1	48	Ar/CO <sub>2</sub>	70	-0.80	21.0	19.5
2+3	48	Ar/CO <sub>2</sub>	8	-0.80	2.4	13.3
4+5	48	Ar/CO <sub>2</sub>	15	-0.80	4.5	13.5

Wie aus der Tabelle hervorgeht, ist bei Lage 0 der Wert leicht erhöht, wohingegen er bei Lage 5 stark erhöht ist (fast Faktor drei). Alle anderen Lagen haben nahezu identische oder sogar geringere Leckwiderstände als die Vergleichswerte der GSI. Der schlechte Wert für Lage 5 lässt sich mit einer nur sehr kurzen Spültdauer erklären - es herrschte Zeitmangel.

Über zwei Wochen später wurden die Lagen erneut getestet, diesmal allerdings immer zwei zusammen. Da die Lagen die ganze Zeit gespült wurden, wurde über die Zeit Restsauerstoff aus Gastaschen und dem Totvolumen der wabenförmigen Struktur über der Padplane entfernt.

## 6.5 Interpretation

Um bei auftretenden Lecks diese lokalisieren zu können, ist es wichtig, die Volumina der einzelnen Kammern zu kennen. Die entsprechenden Daten sind hier daher aufgeführt.

Lage	0	1	2	3	4	5
Länge in mm	1080	1080	1080	1080	1080	1080
Breite in mm	892	936	981	1025	1069	1114
Höhe in mm	37	37	37	37	37	37
Volumen in l	35,6	37,4	39,2	40,9	42,7	44,5

Abbildung 6.17: Übersicht über das Gasvolumen der C0-Kammern

Lage	0	1	2	3	4	5
Länge in mm	1220	1220	1290	1360	1430	1450
Breite in mm	892	936	981	1025	1069	1114
Höhe in mm	37	37	37	37	37	37
Volumen in l	40,2	42,2	46,8	51,5	56,5	59,7

Abbildung 6.18: Übersicht über das Gasvolumen der C1-Kammern

Lage	0	1	2	3	4	5
Volumen in l	196,4	206,2	226,4	246,9	268,7	283,3

Abbildung 6.19: Gasvolumen der Lagen eines Supermoduls

Mit diesen Werten ist es nun möglich, über die Messung des Zeitraumes seit Start des Unterdrucktestes bis zum Auftreten von Peaks im Sauerstoffhistogramm der Software orb510-viewer, die ungefähre Position des Lecks in der Lage zu bestimmen.

Als Beispiel sei hier die Lokalisierung eines defekten Dichtungsringes einer Kammer im Supermodul VI, Lage 1 aufgeführt. Die Leckleitwerte der Kammern betragen für diese Lage zusammen 6,4 l/h.

Zuerst wurde der Überdrucktest gestartet. Er ergab einen Sauerstoff-Offset von 11 ppm. Der folgende Unterdrucktest ergab eine Sauerstoffkonzentration von 45 ppm. Dies entspricht einem Leckleitwert von 17,0 l/h. Wie in Abbildung 6.20 zu sehen, begann die Sauerstoffkonzentration nach ungefähr 3,5 h deutlich anzusteigen. Da aber gleichzeitig Druckschwankungen zu beobachten waren, war der tatsächliche Anstieg durch den Chamber-Breathing-Effekt überdeckt. Daher sank die Sauerstoffkonzentration nach 8 h auch wieder auf das stabile Niveau von 45 ppm. Spülrichtung des Gases war von Stack 4 nach Stack 0. Die vermutete Leckposition lag damit im Bereich von Stack 3 oder Stack 4.

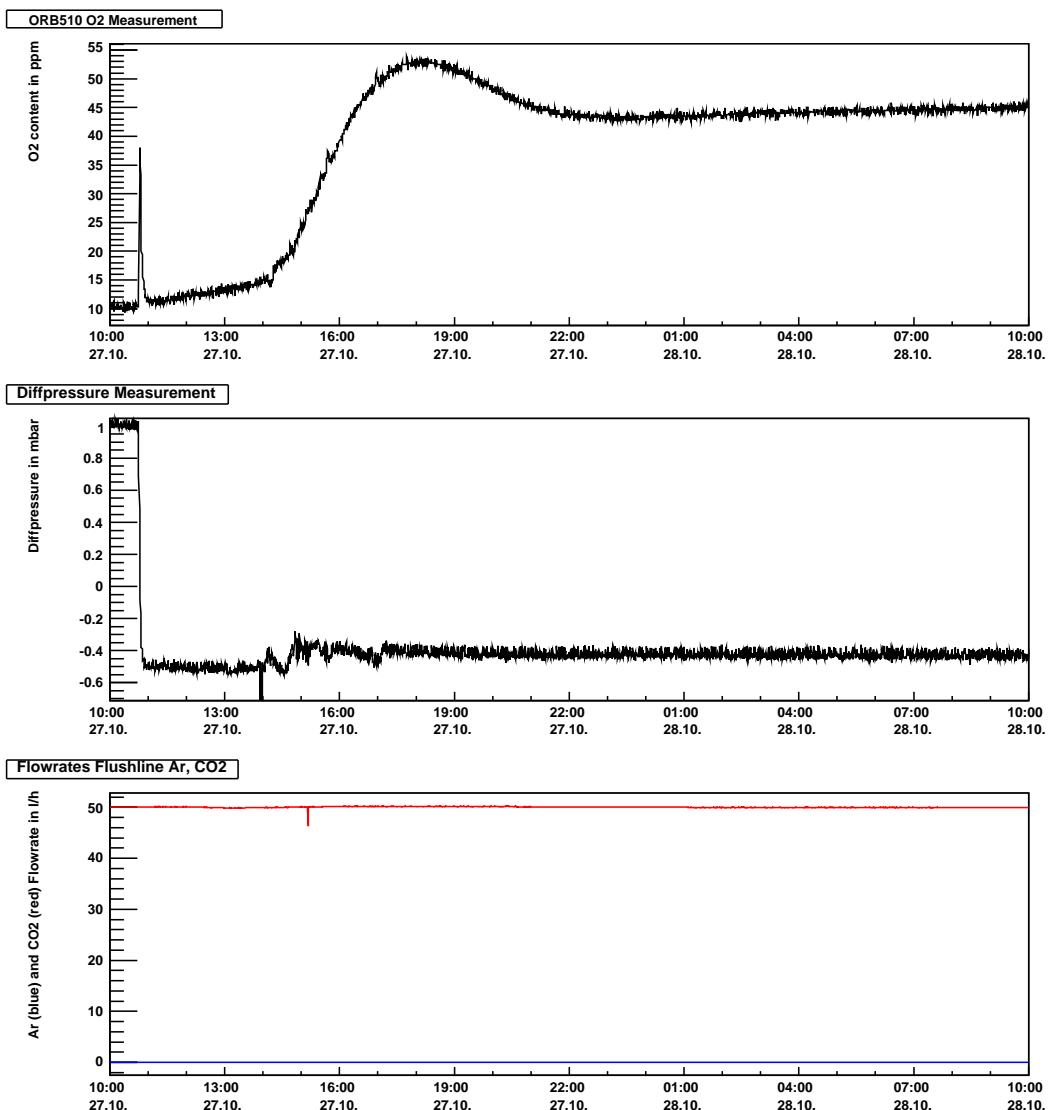


Abbildung 6.20: Der Unterdrucktest, um den Leckleitwert zu bestimmen. Nach 3,5 Stunden ist ein deutlicher Anstieg zu erkennen.

Da die ersten beiden Kammern als Fehlerquellen definitiv ausgeschlossen werden konnten, wurde der Unterdrucktest für die hinteren drei Kammern (Stack 2 bis 4) mit einer geringeren Flussrate von 25 l/h wiederholt (siehe Abbildung 6.21). Dadurch wurde der Zeitraum größer und war genauer zu bestimmen. Es hat sich gezeigt, dass die Hälfte der erreichten Sauerstoffkonzentration ein guter Punkt zur Bestimmung des Zeitraumes ist. Dies ist nach ungefähr 3 h der Fall und entspricht einem gespülten Volumen von 75 l. Die Kammer aus Stack 2 und die erste Hälfte der Stack 3 konnten somit ausgeschlossen werden.

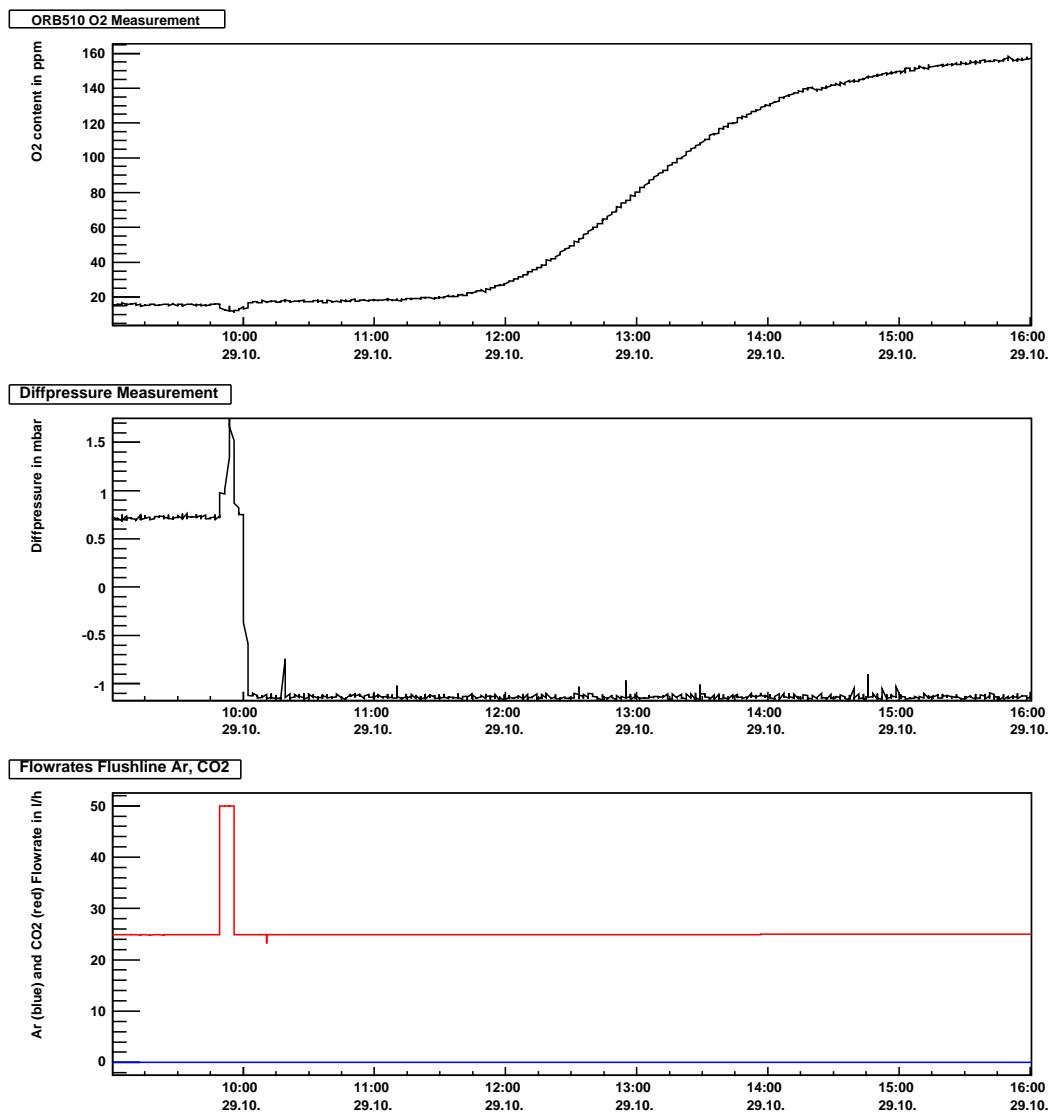


Abbildung 6.21: Erneuter Überdrucktest der letzten drei Kammern Stack 2-4 in Lage 1

Zum Vergleich wurden die Kammern in Stack 2 und 3 separat getestet. Der Unterdrucktest ergab als Leckleitwert für beide Kammern zusammen 3 l/h (siehe Abbildung 6.22). Folgende Fehlerquellen waren demnach noch möglich: die Kammer aus Stack 4 konnte undicht sein und ein Leck aufweisen oder die bei diesem Test nicht benötigten Gasverbinder zwischen Stack 3 und 4 das Problem darstellen.

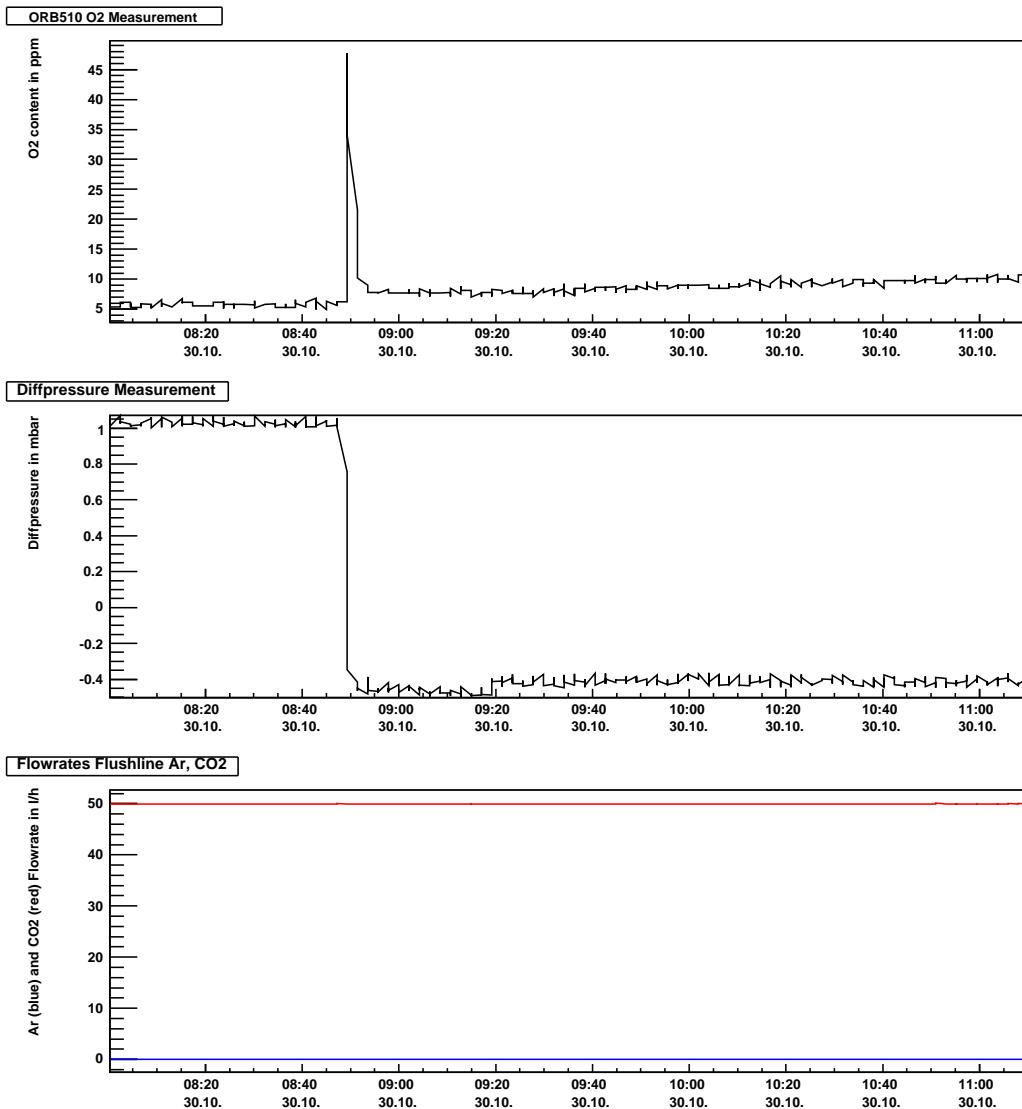


Abbildung 6.22: Unterdrucktest der Kammern in Stack 2 und 3, Leckleitwert gute 3 1/h

Daher wurde die Kammer in Stack 4 (Abbildung 6.23) einzeln getestet. Der Unterdrucktest ergab für den Leckleitwert einen Wert von 1,1 l/h. Es wurde die Flussrate nochmals halbiert, um einen höheren Unterdruck zu erzielen. Durch diese Methode steigt die Sauerstoffkonzentration an und die Differenz zwischen Sauerstoff-Offset des Überdrucktestes und dem beim Unterdrucktest erhaltenen Wert wird größer und ist besser zu bestimmen.

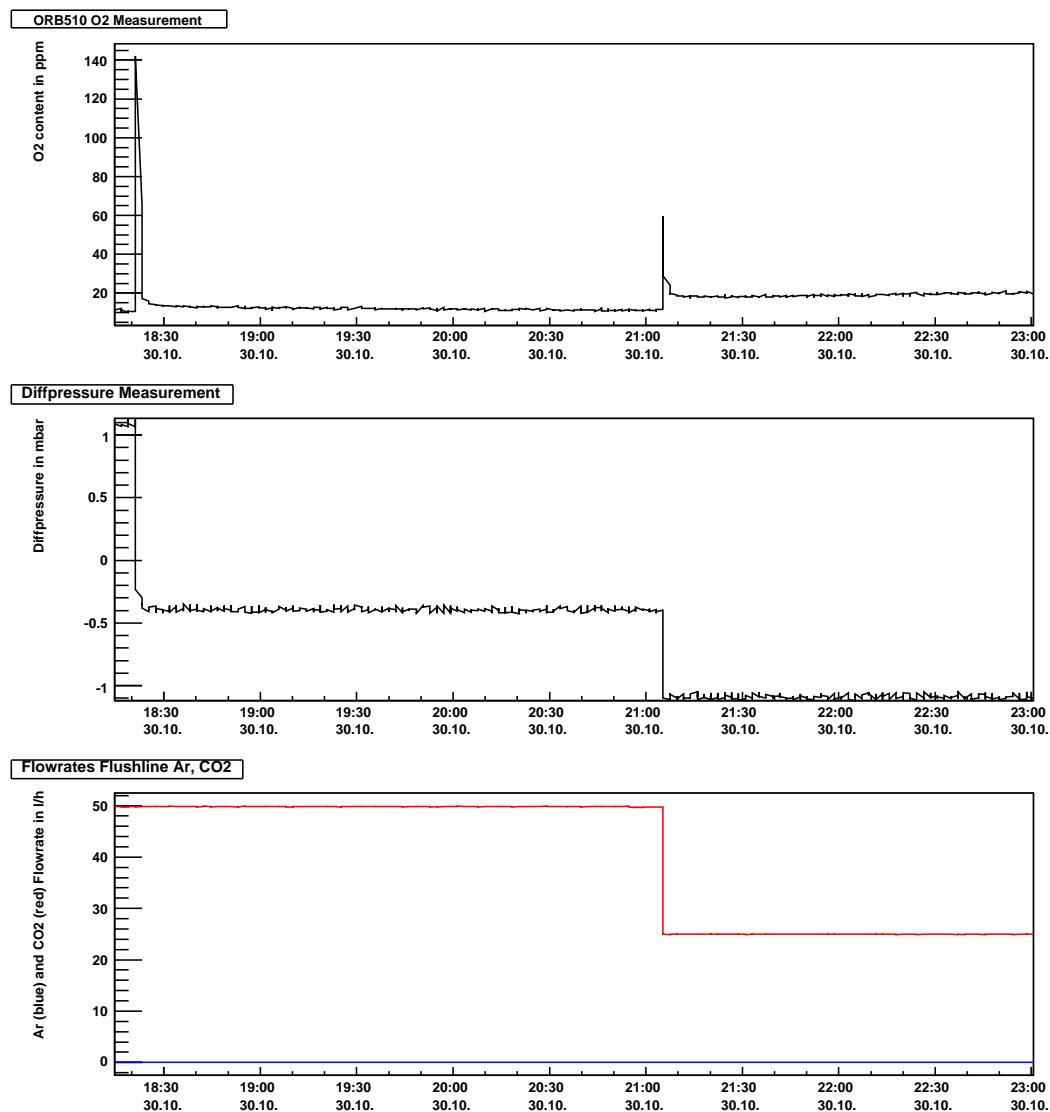


Abbildung 6.23: Unterdrucktest der Stack 4 Kammer. Um 21 Uhr Halbierung der Flussrate

Da alle Kammern den Unterdrucktest positiv bestanden haben (die Werte entsprachen oder unterschritten die Vergleichswerte der GSI-Tests), blieben als letzte Fehlerquelle nur die Gasverbinder zwischen Stack 3 und Stack 4. Nach Auswechseln der Gasverbinder und der Dichtringe wurde aus Zeitgründen nur ein kurzer Unterdrucktest für die jetzt wieder komplett zusammengesetzte Lage 1 durchgeführt. Die Gasflussrichtung wurde umgedreht, so dass die Orbisphere hinter der Stack 4 Kammer positioniert war. Dadurch wurde die benötigte Wartezeit für den Unterdrucktest der Verbindung von der Stack 3 zur Stack 4 Kammer stark herabgesetzt. Nach gut 2 h war das Gas von der Verbindungsstelle zur Orbisphere gespült und konnte auf seinen Sauerstoffgehalt hin analysiert werden. Eine längere Wartezeit war nicht nötig, da nur der Übergang zwischen diesen beiden Kammern getestet wurde. Die Sauerstoffkonzentration betrug

27 ppm. Die Differenz von 14 ppm ergab eine Leckleitrate für die Stack 4 Kammer und den Übergang zur Stack 3 Kammer von 3,3 l/h. Das Problem war somit gefunden und konnte behoben werden.

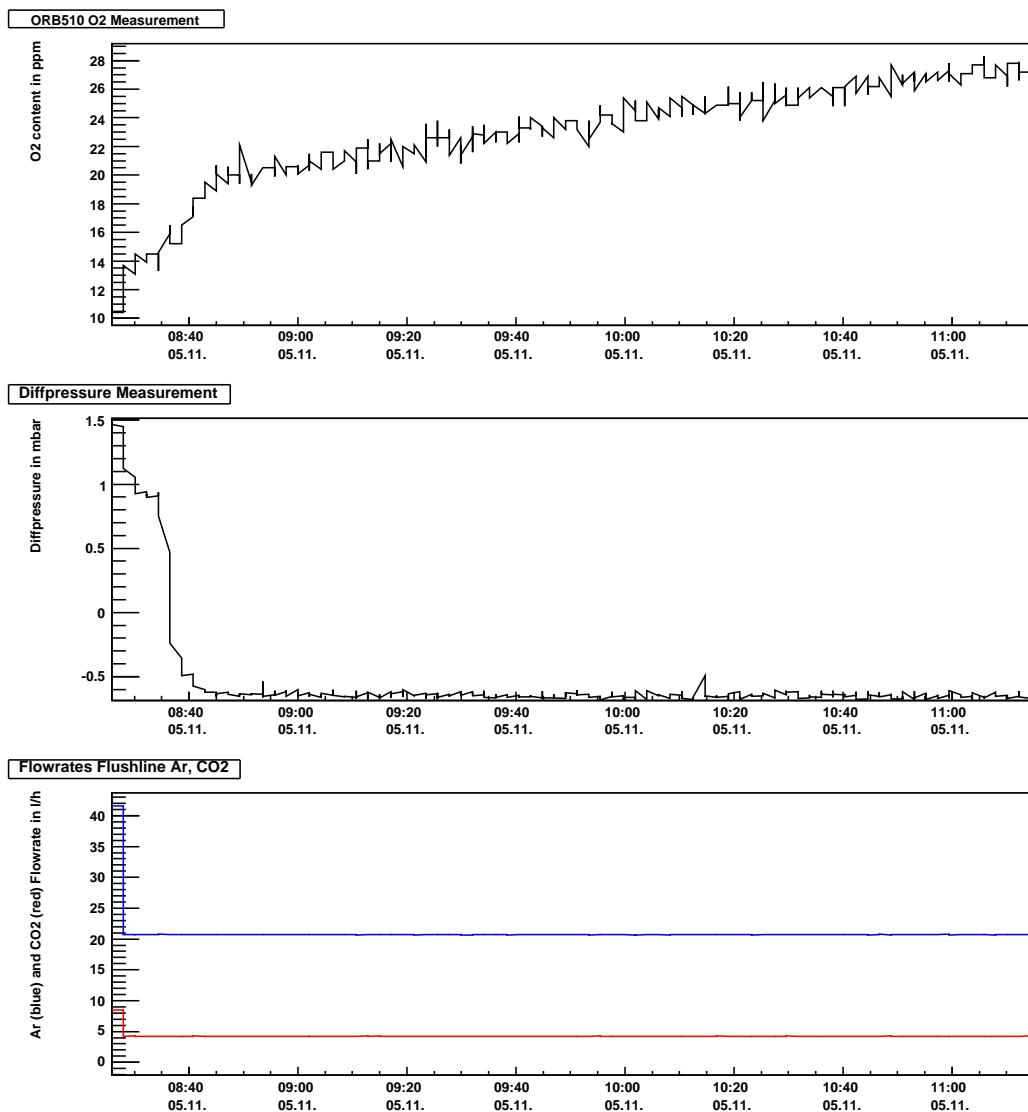


Abbildung 6.24: Überdrucktest Lage 1, getestet wurde nur die Stack 4 Kammer und der Übergang zur Stack 3 Kammer

Die durch die Unterdrucktests erhaltenen Leckleitwerte sind vergleichbar mit den von der GSI bestimmten. Bei Gleichheit oder Unterschreitung dieser kann mit dem Einbau der nächsten Lage begonnen werden. Dadurch, dass die Kammern an der GSI einzeln und in relativ kurzer Zeit getestet worden sind, entsprechen die Leckleitwerte oberen Grenzen, die nicht überschritten werden dürfen. Durch ausdauerndes Spülen ist es jedoch möglich, diese teilweise deutlich zu unterschreiten.

Als guten Richtwert für die Bestimmung der Leckposition hat sich der Zeitpunkt der halben maximalen Sauerstoffkonzentration erwiesen. Der entsprechende Zeitraum ist mit der Flussrate zu multiplizieren. Von dem so erhaltenen Volumen werden, der Spülrichtung entgegen, die Volumina der Kammern abgezogen. Über diese Methode ist es möglich, die Leckposition bis auf eine halbe Kammer genau zu bestimmen. Eine verringerte Flussrate streckt den Zeitraum und ermöglicht eine genauere Bestimmung der Position, erfordert aber auch wesentlich mehr Zeit (halbe Flussrate entspricht doppeltem Zeitaufwand).

# 7 Zusammenfassung

Die in dieser Diplomarbeit vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass das Gassystem in der Lage ist, die geforderte Gasmischgenauigkeit von  $\approx 0,5\%$  zu leisten. Durch das Massenspektrometer wird diese Genauigkeit bestätigt. Da zwei Flaschen pro Gassorte im Flaschenlager verwendet werden, kann der Betrieb durchgängig sichergestellt werden. Die Anwender werden über SMS informiert, wenn Flaschenwechsel notwendig sind.

Die Gastests ermöglichen es den Anwendern, Lecks zuverlässig und bis auf eine halbe Kammer genau zu lokalisieren. Durch Anwendung der „Chamber Breathing“-Technik, ist es möglich, die Kammern schnell von Restgasen zu säubern. Die Tests benötigen jedoch Zeit und sind daher unmittelbar nach der Installation der Kammern im Supermodul zu starten. Etwaige andere Tests, der Elektronik zum Beispiel, können davon unabhängig durchgeführt werden.



# 8 Anhang

## 8.1 Eichprotokolle der Massenflussregler

**mks**  
Technology for Productivity

Calibration Record Feb. / 19 /2007

Model		Calibration Date	MKS-J Ref. No.
M330-WS26173(N2,13C)		2007- 2- 16	P06-036492
Range	Gas	Serial Number	
1 SLM	N <sub>2</sub>	430702001	
Cal.Gas	N <sub>2</sub>		
Calibration Temperature	Inlet Pressure	Outlet Pressure	
Room Temperature	2 bar (1500 Torr)	1 bar (750 Torr)	
Calibration Standard : M310-13C4V1A(N2)		S/N : 96M3003	
Output (%.F.S)	Error (%.F.S)	Remarks	
0	0.0	All Metal Option	
25	+0.7		
50	0.0		
75	-0.3		
100	0.0		
Temp. Characteristics	< 0.1 % / degree C	Valve Close	
Typical response time (0-100%)	< 2 sec	100 kPa(gauge)	Under 5.0 %.F.S (Outlet Pressure : Atmospheric)
Leak Test	< 1 × 10 <sup>-11</sup> Pa · m <sup>3</sup> /secHe		

MKS Japan, Inc.  
5-17-13, Narita-Higashi,  
Suginami-Ku, Tokyo, JAPAN 166

7. Gawa  
MDP Products Support div.



Abbildung 8.1: Eichprotokoll für den 1 SLM CO<sub>2</sub> Flushline MFC

## Calibration Record

Feb. / 19 /2007

Model	Calibration Date	MKS-J Ref. No.
M330-WS26174(N2,14C)	2007- 2- 16	P06-036492
Range	Gas	Serial Number
10 SLM	N <sub>2</sub>	430702002
Cal.Gas	N <sub>2</sub>	
Calibration Temperature	Inlet Pressure	Outlet Pressure
Room Temperature	2 bar (1500 Torr)	1 bar (750 Torr)
Calibration Standard : M310-14C4V1A(N2)		S/N : 97M3001
Output (%.F.S)	Error (%.F.S)	Remarks
0	0.0	All Metal Option
25	+0.4	
50	0.0	
75	-0.1	
100	0.0	
Temp. Characteristics	< 0.1 % / degree C	Valve Close
Typical response time (0-100%)	< 2 sec	100 kPa(gauge) Under 5.0 %.F.S (Outlet Pressure : Atmospheric)
Leak Test	< 1 × 10 <sup>-11</sup> Pa · m <sup>3</sup> /secHe	

MKS Japan, Inc.  
5-17-13, Narita-Higashi,  
Suginami-Ku, Tokyo, JAPAN 166

*J. Gava*  
MDP Products Support div.



Abbildung 8.2: Eichprotokoll für den 10 SLM CO<sub>2</sub> Flushline MFC

## Calibration Record

Feb. / 19 /2007

Model		Calibration Date	MKS-J Ref. No.
M330-WS26175(AR,13C)		2007- 2- 16	P06-036492
Range	Gas	Serial Number	
1 SLM	Ar	430702003	
Cal.Gas	Ar		
Calibration Temperature	Inlet Pressure	Outlet Pressure	
Room Temperature	2 bar (1500 Torr)	1 bar (750 Torr)	
Calibration Standard : M310-13C4V1A(N2)		S/N : 96M3003	
Output (%F.S)	Error (%F.S)	Remarks All Metal Option	
0	0.0		
25	+0.3		
50	0.0		
75	0.0		
100	0.0		
Temp. Characteristics	< 0.1 % / degree C	Valve Close 100 kPa(gauge) Under 5.0 %F.S (Outlet Pressure : Atmospheric)	
Typical response time (0-100%)	< 2 sec		
Leak Test	< $1 \times 10^{-11}$ Pa·m <sup>3</sup> /secHe		

MKS Japan, Inc.  
5-17-13, Narita-Higashi,  
Suginami-Ku, Tokyo, JAPAN 166

J. Baum  
MDP Products Support div.



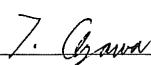
Abbildung 8.3: Eichprotokoll für den 1 SLM Ar Mixline MFC

## Calibration Record

Feb. / 19 /2007

Model	Calibration Date	MKS-J Ref. No.
M330-WS26176(AR,14C)	2007- 2- 16	P06-036492
Range	Gas	Serial Number
10 SLM	Ar	430702004
Cal.Gas	Ar	
Calibration Temperature	Inlet Pressure	Outlet Pressure
Room Temperature	2 bar (1500 Torr)	1 bar (750 Torr)
Calibration Standard : M310-14C4V1A(N2)		S/N : 97M3001
Output (%.F.S)	Error (%.F.S)	Remarks
0	0.0	All Metal Option
25	+0.5	
50	0.0	
75	-0.3	
100	0.0	
Temp. Characteristics	< 0.1 % / degree C	Valve Close
Typical response time (0-100%)	< 2 sec	100 kPa(gauge) Under 5.0 %.F.S (Outlet Pressure : Atmospheric)
Leak Test	< $1 \times 10^{-11}$ Pa · m <sup>3</sup> /secHe	

MKS Japan,Inc.  
 5-17-13, Narita-Higashi,  
 Suginami-Ku, Tokyo, JAPAN 166



MDP Products Support div.



Abbildung 8.4: Eichprotokoll für den 10 SLM Ar Mixline MFC

## Calibration Record

Feb. / 19 /2007

Model		Calibration Date	MKS-J Ref. No.
M330-WS26177(XE,13C)		2007- 2- 16	P06-036492
Range	Gas	Serial Number	
1 SLM	Xe	430702005	
Cal.Gas	Ar		
Calibration Temperature	Inlet Pressure	Outlet Pressure	
Room Temperature	2 bar (1500 Torr)	1 bar (750 Torr)	
Calibration Standard : M310-13C4V1A(N2)	S/N : 96M3003		
Output (%.F.S)	Error (%.F.S)	Remarks All Metal Option	
0	0.0		
25	+0.3		
50	0.0		
75	-0.2		
100	0.0		
Temp. Characteristics	< 0.1 % / degree C	Valve Close 100 kPa(gauge) Under 5.0 %.F.S (Outlet Pressure : Atmospheric)	
Typical response time (0-100%)	< 2 sec		
Leak Test	$< 1 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$		

MKS Japan, Inc.  
5-17-13, Narita-Higashi,  
Suginami-Ku, Tokyo, JAPAN 166

  
MDP Products Support div.



Abbildung 8.5: Eichprotokoll für den 1 SLM Ar Flushline MFC

## Calibration Record

Feb. / 19 /2007

Model	Calibration Date	MKS-J Ref. No.
M330-WS26178(XE,14C)	2007- 2- 16	P06-036492
Range	Gas	Serial Number
10 SLM	Xe	430702006
Cal.Gas	Ar	
Calibration Temperature	Inlet Pressure	Outlet Pressure
Room Temperature	2 bar (1500 Torr)	1 bar (750 Torr)
Calibration Standard : M310-14C4V1A(N2)		S/N : 97M3001
Output (%.F.S)	Error (%.F.S)	Remarks
0	0.0	All Metal Option
25	+0.6	
50	0.0	
75	-0.3	
100	0.0	
Temp. Characteristics	< 0.1 % / degree C	Valve Close
Typical response time (0-100%)	< 2 sec	100 kPa(gauge) Under 5.0 %.F.S (Outlet Pressure : Atmospheric)
Leak Test	< $1 \times 10^{-11}$ Pa · m <sup>3</sup> /secHe	

MKS Japan, Inc.  
5-17-13, Narita-Higashi,  
Suginami-Ku, Tokyo, JAPAN 166

*J. Agava*  
MDP Products Support div.



Abbildung 8.6: Eichprotokoll für den 10 SLM Ar Flushline MFC

## Calibration Record

Feb. / 19 /2007

Model		Calibration Date	MKS-J Ref. No.
M330-WS26179(CH4,13C)		2007- 2- 16	P06-036492
Range	Gas	Serial Number	
1 SLM	CH <sub>4</sub>	430702007	
Cal.Gas	N <sub>2</sub>		
Calibration Temperature	Inlet Pressure	Outlet Pressure	
Room Temperature	2 bar (1500 Torr)	1 bar (750 Torr)	
Calibration Standard : M310-23C4V1A(N2)		S/N : 94M3004	
Output (%.F.S)	Error (%.F.S)	Remarks All Metal Option	
0	0.0		
25	-0.2		
50	0.0		
75	+0.3		
100	0.0		
Temp. Characteristics	< 0.1 % / degree C	Valve Close	
Typical response time (0-100%)	< 2 sec	100 kPa(gauge)	Under 5.0 %.F.S (Outlet Pressure : Atmospheric)
Leak Test	< 1×10 <sup>-11</sup> Pa·m <sup>3</sup> /secHe		

MKS Japan, Inc.  
5-17-13, Narita-Higashi,  
Suginami-Ku, Tokyo, JAPAN 166

*J. Ohmura*  
MDP Products Support div.



Abbildung 8.7: Eichprotokoll für den 1 SLM CO<sub>2</sub> Mixline MFC

## Calibration Record

Feb. / 19 /2007

Model	Calibration Date	MKS-J Ref. No.
M330-WS26180(CH4,14C)	2007- 2- 16	P06-036492
Range	Gas	Serial Number
10 SLM	CH <sub>4</sub>	430702008
Cal.Gas	N <sub>2</sub>	
Calibration Temperature	Inlet Pressure	Outlet Pressure
Room Temperature	2 bar (1500 Torr)	1 bar (750 Torr)
Calibration Standard : M310-24C4V1A(N2)	S/N : 94M3005	
Output (%.F.S)	Error (%.F.S)	Remarks
0	0.0	All Metal Option
25	+0.7	
50	0.0	
75	+0.3	
100	0.0	
Temp. Characteristics	< 0.1 % / degree C	Valve Close
Typical response time (0-100%)	< 2 sec	100 kPa(gauge) Under 5.0 %.F.S (Outlet Pressure : Atmospheric)
Leak Test	< 1 × 10 <sup>-11</sup> Pa · m <sup>3</sup> /secHe	

MKS Japan, Inc.  
5-17-13, Narita-Higashi,  
Suginami-Ku, Tokyo, JAPAN 166

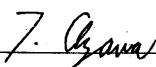
  
MDP Products Support div.



Abbildung 8.8: Eichprotokoll für den 10 SLM CO<sub>2</sub> Mixline MFC

## 8.2 Datenblätter der Drucksensoren

Technische Daten		Typ WU-10, WU-15, WU-16											
		WU-10 / WU-15											
		WU-16											
Messbereich	bar	4	7	10	16	25	40	60	100	160	250	400	
	psi	60	100	160	250	300	500	1000	1500	2000	3000	5000	
Überlastgrenze <sup>1)</sup>	bar	8	14	20	32	50	80	120	200	320	500	500	
Berstdruck <sup>1)</sup>	bar	40	70	100	160	250	400	550	720	720	720	720	
Weitere Druckbereiche und Druckeinheiten (z. B. MPa, kg/cm <sup>2</sup> ) auf Anfrage													
<sup>1)</sup> 1 bar = 14,50 psi													
Messprinzip		Dünnschicht-Sensor											
Werkstoff		2.4711 Elgiloy <sup>*</sup> (sensor); 316L VIM/VAR (Druckschlüssel)											
■ Messstoffberührte Teile		CrNi-Stahl											
Oberflächengüte		Elektropoliert, typ. R <sub>a</sub> ≤ 0,18 µm (R <sub>A</sub> 7); max. Ra ≤ 0,25 µm (R <sub>A</sub> 10)											
Totraumvolumen	mm <sup>3</sup>	WU-10 < 1500, WU-15 < 1000, WU-16 < 1000											
Zulässige Messstoffe		Flüssigkeiten / Gase / Nebel											
Hilfsenergie U <sub>B</sub>	U <sub>B</sub> in VDC	10 < U <sub>B</sub> ≤ 30 (14 ... 30 bei Ausgang 0,1 ... 10 V und 0 ... 10 V)											
Kapazitive Bürde	µF	Max. 0,1 (Spannungsausgang)											
Max. Ausgangstrom	mA	< 1 Ausgangssignal Spannung: Source											
	mA	< 30 Ausgangssignal Strom											
Einstellbarkeit Nullpunkt	% d. Spanne	± 5 durch Potentiometer											
Einstellzeit (10 ... 90 %)	ms	≤ 2											
Spannungsfestigkeitsprüfung	VDC	500											
Genaugigkeit	% d. Spanne	≤ 0,25 für Messbereiche > 4 bar (BFSL)											
	% d. Spanne	≤ 0,5 für Messbereiche ≤ 4 bar (BFSL)											
	% d. Spanne	≤ 0,5 <sup>2)</sup> für Messbereiche > 4 bar											
	% d. Spanne	≤ 1,0 <sup>2)</sup> für Messbereiche ≤ 4 bar											
		<sup>2)</sup> Einschließlich Nichtlinearität, Hysterese, Nullpunkt- und Endwertabweichung (entspricht Messabweichung nach IEC 61298-2).											
		Kalibriert bei senkrechter Einbaulage Druckschlüssel nach unten.											
Nichtlinearität	% d. Spanne	≤ 0,15 für Messbereiche > 4 bar (BFSL) nach IEC 61298-2											
	% d. Spanne	≤ 0,3 für Messbereiche ≤ 4 bar (BFSL) nach IEC 61298-2											
Stabilität pro Jahr	% d. Spanne	≤ 0,2 (bei Referenzbedingungen)											
Zulässige Temperaturbereiche													
■ Messstoff	°C	-40 ... +100											
■ Umgebung	°C	-20 ... +85											
■ Lagerung	°C	-40 ... +100											
Kompensierter Temperaturbereich													
Temperaturkoeffizienten im kompensierten Temperaturbereich:													
■ Mittlerer TK des Nullpunktes	% d. Spanne	≤ 0,1 / 10 K											
■ Mittlerer TK der Spanne	% d. Spanne	≤ 0,15 / 10 K											
CE-Kennzeichen													
■ Druckgeräterichtlinie		97/23/EG											
■ EMV-Richtlinie		89/336/EWG Störemission (Grenzwertklasse B) und Störfestigkeit nach EN 61 326											
Shockbelastbarkeit	g	500 nach IEC 60068-2-27 (Shock mechanisch)											
Vibrationsbelastbarkeit	g	10 nach IEC 60068-2-6 (Vibration bei Resonanz)											
Elektrische Schutzzarten													
■ Kurzschlussfestigkeit		Sig+ gegen U B-											
■ Verpolschutz		UB+ gegen U B-											
Masse	kg	ca. 0,1											

Abbildung 8.9: Datenblatt des Flaschendrucksensors, Typ WU-10, 250 bar

# CTE7000 / CTU7000 Series

## Miniature pressure transmitters

### COMMON PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Characteristics		Min.	Typ.	Max.	Proof <sup>3</sup>	Unit
Operating pressure	CTEM70010...	0		10	250	<-- mbar
	CTEM7N010...	-10		10	250	
	CTEM70025...	0		25	350	
	CTEM7N025...	-25		25	350	
	CTEM70070...	0		70	1000	
	CTEM7N070...	-70		70	1000	
	CTEM70350...	0		350	1000	
	CTEM7N350...	-350		350	1000	
	CTE7001...	0		1	2	
	CTE7N01...	-1		1	2	
	CTE7P01...	-1		0	2	
	CTE7002...	0		2	4	
	CTE7005...	0		5	10	
	CTE7007...	0		7	10	
Thermal effects (0 to 50°C) <sup>4</sup>	CTU700x15...	0		0.15	3.6	psi
	CTU7N0x15...	-0.15		0.15	3.6	
	CTU700x3...	0		0.3	5	
	CTU7N0x3...	-0.3		0.3	5	
	CTU7001...	0		1	15	
	CTU7N01...	-1		1	15	
	CTU7005...	0		5	15	
	CTU7N05...	-5		5	15	
	CTU7015...	0		15	30	
	CTU7N15...	-15		15	30	
	CTU7P15...	-15		0	30	
	CTU7030...	0		30	60	
	CTU7100...	0		100	150	
	Offset	CTEM70010..., CTEM7N010.../ CTU700x15..., CTU7N0x15...			0.08	%FSO/°C
	Span	CTEM70025..., CTEM7N025.../ CTU700x3..., CTU7N0x3...			0.08	
	all others				0.04	
	Span				0.04	
Thermal effects (-20 to 0°C, 50 to 70°C)	Offset		0.03			%FS
	Span		0.03			
Non-linearity and hysteresis (BSL) <sup>5</sup>			±0.2	±0.50		
Repeatability			±0.1			
Long term stability <sup>6</sup>			±0.5			
Output noise (0 < f < 1 kHz)			±0.04			ms
Response time (10 to 90 %)			1.0			
Power supply rejection	Offset	CTE(M)/CTU7...0, ...6, ...7 CTE(M)/CTU7...4	0.002 0.05			%FSO/V
	Span	CTE(M)/CTU7...0, ...6, ...7 CTE(M)/CTU7...4	0.002 0.08			

Abbildung 8.10: Datenblatt des Differenzdrucksensors am Supermodul, Typ CTEM7N010GQ4, -10 – +10 mbar

## 8.3 Datenblatt des Massenspektrometers

SPECIFICATIONS																		
Sensor length (vacuum side)	4.6" (11.7 cm)		7" (17.8 cm)	10.4" (26.4 cm)	7" (17.8 cm)	10.4" (26.4 cm)	7" (17.8 cm)	10.4" (26.4 cm)										
Mass Range	1 to 100 amu			1 to 100 amu			1 to 200 amu											
Detector Type	FC	Microchannel Plate EM/FC	FC	EM/FC	FC	EM/FC	FC	FC	EM/FC									
Resolution (per 1993 AVS Recommended Practice)	< 1 amu wide @ 10% peak height over the entire mass range																	
Temperature Coefficient (during an 8-hour period, after a half hour warm-up)	< 1% of peak height per degree C (for FC Only)																	
Sensitivity—amps/Torr (mbar/Torr):	FC EM	2x10 <sup>-4</sup> (1.5x10 <sup>-4</sup> ) N/A	2x10 <sup>-4</sup> (1.5x10 <sup>-4</sup> ) 0.25 (0.2)	2x10 <sup>-4</sup> (1.5x10 <sup>-4</sup> ) N/A	1x10 <sup>-4</sup> (7.6x10 <sup>-5</sup> ) 500 (380)	2x10 <sup>-4</sup> (1.5x10 <sup>-4</sup> ) N/A	1x10 <sup>-4</sup> (7.6x10 <sup>-5</sup> ) 500 (380)	1x10 <sup>-4</sup> (7.6x10 <sup>-5</sup> ) N/A	5x10 <sup>-5</sup> (3.8x10 <sup>-5</sup> ) 250 (190)									
Min. Detectable Partial Pressure	FC EM	3x10 <sup>-13</sup> (4x10 <sup>-13</sup> ) N/A	N/A	3x10 <sup>-13</sup> (4x10 <sup>-13</sup> ) N/A	N/A	3x10 <sup>-13</sup> (4x10 <sup>-13</sup> ) 5x10 <sup>-15</sup> (6.6x10 <sup>-15</sup> )	N/A	6x10 <sup>-13</sup> (8x10 <sup>-13</sup> ) N/A	N/A									
Zero Blast Interference	at Mass 2		< 100 ppm															
Max. Operating Pressure—Torr (mbar):	5x10 <sup>-4</sup> (6.6x10 <sup>-4</sup> )																	
Max. Sensor Operating Temp.	FC EM	200°C N/A	200°C 150°C	250°C N/A	250°C 150°C	250°C N/A	250°C 150°C	250°C N/A	250°C 150°C									
Max. Bakeout Temperature (electronics removed)	200°C		350°C	350°C	350°C	350°C	350°C	350°C	350°C									
Operating Temperature	20°C to 50°C ambient																	
Power Input	20 to 30V DC, 9-pin male "D" connector, internally isolated from system ground																	
RS232 Serial Communications Interface	nonisolated, baud selection 1200 through 9600, 9-pin female "D" connector, TxD, RxD, CTS, DTR																	
RS485 Addressable Communications Interface	isolated, 4 wire, 57,600 baud fixed, half duplex, global address @ 0, fixed address 1 of 31, 9-pin female "D" connector, +TxD, -TxD, +RxD, -RxD																	
Relay Outputs	4 relays, 24 V at 0.5 amps (1 for operational status, 3 for setpoint limits)																	
Inputs	2 nonisolated TTL inputs, contact closure (1 for remote emission on, 1 for remote emission off); 2 differential analog inputs, 0 to 10 V DC																	
Electronics Enclosure	drip-resistant																	
User-Configured Switches (8-position DIP switch)	5 positions: device address (1 of 31); Primary Link Select (RS232/485); 2 positions: baud rate																	
LED Indicators (green)	1 for CPU status, 1 for emission status																	
<small>N/A = not applicable</small> <small>* Electronics and sensors may be purchased separately.</small> <small>Multiplexing operation requires optional software.</small> <small><sup>1</sup> Minimum detectable partial pressure is calculated as the standard deviation of the noise (minimum detectable signal) divided by the sensitivity of the sensor (FC or EM) measured at a four-second dwell time.</small>																		
<small>Transpector and FabGuard are registered trademarks and TWare32 is a trademark of INFICON. All other trademarks are the property of their respective owners.</small>																		

Abbildung 8.11: Datenblatt des Massenspektrometers, Typ Transpector v2, H200M, max. 200 AMU

## 8.4 Interpretationsanleitung Massenspektrometer



### TECHNICAL NOTE

#### General RGA Spectrum Interpretation Guide

AMU	ION(S)	SOURCE(S)
1	H	Hydrogen, Water, Acids, HY
2	H <sub>2</sub>	Hydrogen
	D	Deuterium
3	HD	Hydrogen – Deuterium
	He	<sup>3</sup> Helium
4	He	Helium
6	C	DI Carbon
7	N	DI Nitrogen
8	O	DI Oxygen
10	Ne	DI Neon
11	Ne	DI <sup>22</sup> Neon
12	C	Carbon dioxide or monoxide, HY, HL
13	CH	Methane, HY
14	CH <sub>2</sub>	Methane, HY
	N	Nitrogen, Ammonia
15	CH <sub>3</sub>	Methane, HY
	NH	Ammonia
16	CH <sub>4</sub>	Methane, HY
	NH <sub>2</sub>	Ammonia
	O	Oxygen, Carbon dioxide or monoxide, Water, Alcohol
17	NH <sub>3</sub>	Ammonia
	OH	Water, Alcohol
18	H <sub>2</sub> O	Water
	Ar	DI <sup>36</sup> Argon

AMU	ION(S)	SOURCE(S)
19	F	Fluorine, Hydrofluoric acid, HL, Silicon tetrafluoride, PFK, PFTBA
20	HF	Hydrofluoric acid
	Ar	DI Argon
	Ne	Neon
22	Ne	<sup>22</sup> Neon
	CO <sub>2</sub>	DI Carbon dioxide
24	C <sub>2</sub>	HL, HY
25	C <sub>2</sub> H	HY
	CF <sub>2</sub>	HL, DI CF <sub>2</sub>
26	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	HY
	CN	Hydrogen cyanide
27	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub>	HY
	HCN	Hydrogen cyanide
28	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	HY
	CO	Carbon dioxide or monoxide
	N <sub>2</sub>	Nitrogen, Air
	Si	Silicon, Silicon tetrafluoride
29	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	HY
	COH	Alcohol
	N <sub>2</sub>	<sup>15</sup> Nitrogen + <sup>14</sup> Nitrogen
30	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	HY
	COH <sub>2</sub>	Alcohol
	N <sub>2</sub>	<sup>15</sup> Nitrogen <sub>2</sub>
	NO	Nitrogen oxides

DI = Doubly ionized  
 HY = Hydrocarbon fragment  
 HL = Halocarbon fragment  
 PFK = Perfluorokerosene  
 PFTBA = Perfluorotributylamine

NOTES:  
 1) 5, 9, 21, and 23 AMU do not have commonly found ions.  
 2) All are seen as positive ions.  
 3) Minor isotopes identified by superscripted atomic weight.

Abbildung 8.12: Übersicht über die Massen 1 bis 30 AMU [22]

AMU	ION(S)	SOURCE(S)
31	CH <sub>3</sub> O	Alcohol
	CF	HL, PFK, PFTBA
	P	Phosphorus
32	CH <sub>3</sub> OH	Alcohol
	CHF	HL
	O <sub>2</sub>	Oxygen
	S	Sulfur
33	SH	Hydrogen sulfide
	S	<sup>33</sup> Sulfur
	CH <sub>2</sub> F	HL
	H <sub>2</sub> S	Hydrogen sulfide
34	SH	Hydrogen <sup>33</sup> sulfide
	S	<sup>34</sup> Sulfur
	CH <sub>3</sub> F	HL
	H <sub>2</sub> S	Hydrogen <sup>33</sup> sulfide
35	C1	Chlorine, Hydrochloric acid, HL, Chlorobenzene, Carbon, tetrachloride
	OF	HL
	H <sub>2</sub> S	Hydrogen <sup>34</sup> sulfide
	HC1	Hydrochloric acid
36	C <sub>3</sub>	HY
	Ar	<sup>36</sup> Argon
	C <sub>1</sub>	<sup>37</sup> Chlorine, HL, Hydrochloric acid Chlorobenzene, Carbon tetrachloride
	C <sub>3</sub> H	HY
37	HC1	Hydrogen <sup>37</sup> chloride
	C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	HY
	F <sub>2</sub>	HL, Fluorine

AMU	ION(S)	SOURCE(S)
39	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub>	HY
40	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	HY
	Ar	Argon
41	C <sub>3</sub> H <sub>5</sub>	HY
	C <sub>2</sub> HO	Alcohol
42	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	HY
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O	Alcohol
43	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub>	HY
	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O	Alcohol, Acetone, Methyl Ethyl Ketone
44	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	HY
	CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide
	N <sub>2</sub> O	Nitrous oxide
	CS	Carbon disulfide
45	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O	Alcohol
46	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Alcohol
	NO <sub>2</sub>	Nitrogen dioxide
47	CC1	Carbon tetrachloride, HL
	SiF	Silicon tetrafluoride
48	CHC1	HL
	SO	Sulfur dioxide
49	CH <sub>2</sub> C1	HL, Chlorobenzene
	CC1	Carbon tetrachloride, HL
50	CHC1	HL, Chlorobenzene
	CF <sub>2</sub>	HL, PFK, PFTBA
	C <sub>4</sub> H <sub>2</sub>	HY
	SO <sub>2</sub>	Sulfur dioxide

DI = Doubly ionized  
 HY = Hydrocarbon fragment  
 HL = Halocarbon fragment  
 PFK = Perfluorokerosene  
 PFTBA = Perfluorotributylamine

NOTES:  
 1) 5, 9, 21, and 23 AMU do not have commonly found ions.  
 2) All are seen as positive ions.  
 3) Minor isotopes identified by superscripted atomic weight.



GLOBAL HEADQUARTERS:

Two Technology Place, East Syracuse, NY 13057 USA  
 Tel: +1.315.434.1100 Fax: +1.315.437.3803 E-mail: [reachus@inficon.com](mailto:reachus@inficon.com)

UNITED STATES FRANCE GERMANY LIECHTENSTEIN SWITZERLAND UNITED KINGDOM CHINA JAPAN KOREA SINGAPORE TAIWAN

Visit our website for contact information and other sales offices worldwide. [www.inficon.com](http://www.inficon.com)  
 aicb96a1 ©2003 INFICON

Abbildung 8.13: Übersicht über die Massen 31 bis 50 AMU [22]

## 8.5 Datenblatt des Orbisphere 510 Sensors

Application dependent membrane/Sensor specification							
Membrane Model	2935A	2952A	2956A	2958A	29521A	29552A	2995A
Recommended Applications	Saturated to super saturated levels		corrosion control; in-line beverage; deaerated water		In-line hot wort (max. 70 °C)	In-line wort; air /O <sub>2</sub> injection; sewage treatment	Saturated to super saturated levels
Material	Halar®	Tefzel®	PFA	Tefzel®	Tefzel®	PTFE	Tedlar®
Thickness	25 µm	25 µm	25 µm	12.5 µm	125 µm	50 µm	12.5 µm
Integrated radiation dose limit	N/A	10 <sup>8</sup> rads	2 x 10 <sup>4</sup> rads	10 <sup>8</sup> rads	10 <sup>8</sup> rads	N/A	10 <sup>8</sup> rads
Current in air at 25° C	1 µA	5 µA	25 µA	8 µA	0.75 µA	5 µA	0.2 µA
Dissolved O <sub>2</sub> measurement range	10 ppb- 400 ppm	1 ppb- 80 ppm	0.1 ppb- 20 ppm	1 ppb- 40 ppm	10 ppb- 400 ppm	2 ppb- 80 ppm	50 ppb- 2000 ppm
Gaseous O <sub>2</sub> measurement range	20 Pa- 1000 kPa	5 Pa- 200 kPa	0.25 Pa- 50 kPa	2 Pa- 100 kPa	20 Pa- 1000 kPa	5 Pa- 200 kPa	100 Pa- 5000 kPa
Accuracy (Assuming correct calibration)	± 1% of reading, or ± lower measurement range, whichever is greater						
Temperature compensated range	-5 to 60 °C	-5 to 60 °C	-5 to 60 °C	-5 to 60 °C	-5 to 60 °C	-5 to 60 °C	-5 to 60 °C
Response time	2.5 min.	38 sec.	7.2 sec.	9.5 sec.	18 min.	90 sec.	80 sec.
Recommended liquid flow rate*, ml per min., in 32001 flow chamber	25	50	180	120	25	50	5
Recommended linear liquid flow rate* cm/sec	20	30	200	100	60	30	5
Recommended gaseous flow rate	0.1 to 3 l/min.	0.1 to 3 l/min.	0.1 to 3 l/min.	0.1 to 3 l/min.	0.1 to 3 l/min.	0.1 to 3 l/min.	0.1 to 3 l/min.

\* Flow rates for Model 32001 Flow Chamber are valid for sensor used with a Model 29104 Protection Cap, without a stainless steel grill. Use of the grill as in protection cap model 29106 will require approximately 50% faster flow.

**Sensor configurations**

Sensor Model	Standard materials of construction	Pressure rating (bar)	Weight (grams)	
Meas. Cell	Head**	Body***		
3111X	PEEK	PEEK	20	200
3112X	PEEK	Stainless steel	50	620
3113X	Titanium	Stainless steel	100	640
3114X	Titanium	Stainless steel	200	670
--- A	Sensors with fast response to temperature changes			
--- E	Intrinsically safe EEx certified sensors			
--- S	Smart sensors to be used with Orbisphere Multi analyzer			

\*\* Parts in contact with the sample, also available in the following materials: Hastelloy, Titanium, and Monel. O-rings available in EPDM, Viton, Kalrez and Nitril.

\*\*\* O-rings are in EPDM.

© 2003 Hach Ultra Analytics / Printed in Switzerland / 31xx.BR.E0502



In the interest of continued product development, Hach Ultra Analytics reserves the right to make improvements to this literature and/or the products it describes, without notice or obligation.

**Hach Ultra Analytics**  
 salesinfo@hachultra.com  
 Tel. ++41 22 855 91 00  
 Fax ++41 22 855 91 99  
 6, route de Composis, C.P.212  
 CH-1222 Vésenaz, Geneva  
 Switzerland

Represented By



Abbildung 8.14: Datenblatt des elektrochemischen Sauerstoffsensors, Membran 2956A

# Literaturverzeichnis

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik Bd. 4: Kern-, Teilchen- und Astrophysik*. Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [2] W.-M. Yao et al. Review of Particle Physics. *Journal of Physics G*, 33:1+, 2006.
- [3] A. Andronic and P. Braun-Munzinger. Ultrarelativistic nucleus nucleus collisions and the quark-gluon plasma. *Lect. Notes Phys* 625, 625:35–68, 2004.
- [4] C Lefevre. LHC: the guide, <http://cdsweb.cern.ch/record/1092437>, Jan 2008.
- [5] ATLAS Experiment @ LHC.
- [6] CMS Experiment @ LHC.
- [7] LHCb Experiment @ LHC.
- [8] LHCf Experiment @ LHC, keine eigene Homepage (Stand: Januar 2009).
- [9] TOTEM Experiment @ LHC.
- [10] L3 Experiment @ LEP.
- [11] The ALICE Collaboration and K Aamodt et al. *Journal of Instrumentation*, 3(08):S08002, 2008. The ALICE experiment at the CERN LHC, <http://stacks.iop.org/1748-0221/3/S08002>.
- [12] The ALICE Collaboration, 2008. <http://aliceinfo.cern.ch/Public/Objects/Chapterv2/ALICE-SetUp-NewSimple.jpg>.
- [13] The ALICE Collaboration. Trd technical design report. 2003. CERN/LHCC 2001-021, ALICE-DOC-2004-009, <https://edms.cern.ch/document/398057/1>.
- [14] R. Veenhof. Garfield, recent developments. *Nucl. Instr. Meth.*, A 419:726–730, 1998.
- [15] S.F. Biagi. Monte carlo simulation of electron drift and diffusion in counting gases under the influence of electric and magnetic fields. *Nucl. Instr. Meth.*, A 421:234–240, 1999.
- [16] G. Tsiledakis und A. Wasem C. Garabatos, F. Hahn. Trd gas regeneration by cryogenic distillation, alice internal note 37-2002, 2002.
- [17] Linde Gas Deutschland. Nebenbestandteile der verwendeten Gase, <http://www.linde-gase.de/produkte/industriegase/industriegase/argon.html> und [http://www.linde-gase.de/produkte/spezialgase/spezialgase/kohlendioxid\\_4.5.html](http://www.linde-gase.de/produkte/spezialgase/spezialgase/kohlendioxid_4.5.html).

- [18] Wikipedia User Biezl, 2008. [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Thermische\\_massendurchflussmessung\\_en.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Thermische_massendurchflussmessung_en.svg).
- [19] Giselher Marx. 2000. Elementspezifische Wechselwirkungen von aquatischen Huminstoffen.
- [20] InProcess Instruments. <http://www.in-process.com/1/pic/massenspektrometrie/arbeitsprinzip.gif>.
- [21] W. Lasareff und B. Rosen E. Friedländer, H. Kallmann. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, 76:60–69, 1932. Über die Dissoziation von Molekülionen durch Stoß.
- [22] Inficon. Technical Note: General RGA Spectrum Interpretation Guide, [http://www.inficon.com/download/en/Spectrum\\_Guide.pdf](http://www.inficon.com/download/en/Spectrum_Guide.pdf).
- [23] EP Division C. Gaspar, DIM Group. DIM Introduction, <http://dim.web.cern.ch/dim/>.
- [24] Universität Heidelberg Physikalisches Institut, 2007. Bildgallerie des Physikalischen Instituts, <http://www.physi.uni-heidelberg.de/pics/calendar5-.jpg>.

## Danksagungen

Allen voran danke ich Herrn Prof. Dr. Johannes Wessels für die Möglichkeit, die Arbeit am Institut für Kernphysik verfassen zu können. Ebenso verdanke ich ihm die lehrreichen Besuche in Heidelberg, an der GSI in Darmstadt und am CERN in Genf. Sehr dankbar bin ich ihm zudem, einen Einblick in eine internationale Kollaboration bekommen und in dieser mitgearbeitet zu haben.

Dr. Tom Dietel danke ich für die Betreuung der Arbeit, für die vielen Tipps in der heißen Phase und der Beantwortung vieler Fragen.

Daneben gilt mein Dank Helmut Baumeister für seine Geduld und die ständige Bereitschaft, Umbauten am Gassystem vorzunehmen.

Roland Berendes danke ich für das Entwerfen und Anfertigen von elektrischen Schaltungen aller Art.

Bedanken möchte ich mich außerdem bei dem Team der mechanischen Werkstätten, dem Team der E-Werkstätten, sowie der Arbeitsgruppe: Björn Albrecht, Bastian Bauthen, Christoph Baumann, Cyrano Bergmann, Henriette Gatz, Holger Gottschlag, Markus Heide, Norbert Heine, Dr. Matus Kalisky, Sebastian Klamor, Dr. Christian Klein-Bösing, Melanie Klein-Bösing, Stefan Korsten, Michael Kowalik, Jan-Friederik Pietschmann, Markus Rammel, Dr. Klaus Reygers, Baldo Sahlmüller, Eva Sicking, Anton Sperling, Wolfgang Verhoeven, Don Vernekohl, Matthias Walter, Uwe Westerhoff, Alexander Wilk und Svenja Wulff.

Mein Dank gilt darüber hinaus meinen Eltern für Ihre Geduld und meiner Freundin Anne Kohlert für ihre mentale Unterstützung.

Zu guter Letzt spreche ich allen meinen Dank aus, die mich während der Erstellung dieser Diplomarbeit hilfreich mit Rat und Tat unterstützt haben.

Hiermit bestätige ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Münster, 18. Januar 2009

Helge Grimm