

do not remove !

RWTH RHEINISCH
WESTFÄLISCHE
TECHNISCHE
HOCHSCHULE
AACHEN

PITHA 94/50

Oktober 1994

Entwicklung, Bau und Betrieb
universeller Anlagen zur Gasversorgung
für das innere Spurkammersystem
des H1-Detektors

Siegfried Masson

III. Physikalisches Institut der Technischen Hochschule Aachen
52056 Aachen, Germany

PHYSIKALISCHE INSTITUTE
RWTH AACHEN
52056 AACHEN, GERMANY

Entwicklung, Bau und Betrieb universeller Anlagen zur Gasversorgung für das innere Spurkammersystem des H1-Detektors

Von der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
– Fachbereich 1 –
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Physiker
Siegfried Masson
aus Unkel

Referent: Universitätsprofessor Dr. G. Flügge
Korreferent: Privatdozent Dr. W. Struczinski

Tag der mündlichen Prüfung: 24.10.1994

Abstract

The inner part of the universal detector H1 at the HERA accelerator at DESY consists of a complex arrangement of gas filled proportional and drift chambers for tracking. To supply the 16 individual devices with gas, three self-contained but almost identical "gas systems" were developed. This thesis describes the design, construction and running experiences of the H1 gas systems.

To guarantee an optimal performance of the different chambers, a flux of an individual gas mixture is required in each. The most important mixing methods for gases and the applications used in the H1 gas rigs are described. To ensure the mechanical stability of the fragile chambers, a sensitive pressure control ($< 0,1$ Pa) is installed within each of the 11 independent main gas circuits. Using a computer controlled regulation, the pressure inside the chambers can be kept within a few Pa around atmosphere. To minimize the expenses for gases and to maintain the long term stability of the gas composition, the big chambers are supplied by closed loop gas circuits. The accumulation of unavoidable contaminations in the chamber gas is limited by a set of permanently working purifiers. Methods are presented, which for the first time, allow to use gases with alcohol admixtures in this type of gas circuit. In addition to the permanently measuring gas quality monitors, a universal gas chromatograph is automatically switched to all gas circuits. Combined with an oxygen analyser, this arrangement delivers a complete analysis of the gas composition, including the option of looking for impurities.

The design and construction of the H1 gas systems started in late 1988. After extensive chamber testing, the final installation took place in December 1990. Including infrastructure and upgrades the total costs are about 1.000.000,- DM. All relevant mechanical drawings of the gas circuits and lists of the electronic devices are appended.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Einführung	3
2.1 HERA	3
2.2 Physik an HERA	5
2.3 Der H1-Detektor	8
2.4 Spurkammern und Gas	11
3. Spurkammersystem	17
3.1 Design der Vieldrahtkammern	17
3.2 Funktionsweise und Gaseinfluß	23
3.3 Langzeitverhalten und Alterung	30
4. Anlagen zur Gasversorgung	33
4.1 Anforderungen an die Gasversorgung	33
4.2 Grundkonzept der Kreislaufanlagen	35
4.3 Anordnung der Gassysteme im H1-Experiment	38
4.4 Mechanischer Aufbau der Gassysteme	40
4.5 Elektronik der Gassysteme	42
5. Herstellung der Gasgemische	51
5.1 Herstellungsverfahren von Prüfgasgemischen	51
5.2 Massenflußmesser und -regler	54
5.3 Mischen in geschlossenen Kreisläufen	57
5.4 Zumischung der Additive	61
5.5 Vorgemische	70
6. Druck und Fluß in den Kreisläufen	77
6.1 Einführung Kammerdruckregulierung	77
6.2 Potentiale und Flüsse	79
6.3 Kammerdruck	89
6.4 Kammerdruckregulierung	95
7. Reinigung der Gase	99
7.1 Methoden zur Gasreinigung	99
7.2 Reinigerverhalten mit Wasser und Alkoholdämpfen	105
7.3 Aufbau und Funktion der H1-Reinigeranlagen	109
7.4 Ergebnisse der Gasreinigung	113
8. Gasqualitätsüberwachung	121
8.1 Motivation	121
8.2 Physikalische Methoden zur Gasqualitätsüberwachung	122
8.3 Bewertung und Auswahl der Geräte	131
8.4 Realisierung und Resultate der Gasqualitätsüberwachung	134
9. Zusammenfassung	139

Anhang A: Erklärung der logischen Namen	141
Anhang B: Ein-/Ausgabemodule	144
Anhang C: Elektronikeinschübe	150
Anhang D: Multipositionsventile für den GC	152
Anhang E: Verrohrungspläne	154
Anhang F: Gase	172
Abbildungsverzeichnis	174
Tabellenverzeichnis	177
Literatur- und Herstellerverzeichnis	179

1. Einleitung

In der Elementarteilchenphysik werden in internationaler Zusammenarbeit Experimente entwickelt und durchgeführt, deren Ergebnisse zur Aufstellung von Modellen und letztlich zur Theorie der elementaren Bausteine der Materie und deren Wechselwirkungen führen sollen. Zur Zeit bildet das "Standardmodell" die theoretische Grundlage. Ein Zugang hierzu sind Streuexperimente, in denen mit punktförmigen Sonden wie Elektronen oder Neutrinos Strukturen (z.B. Nukleonen) abgetastet werden. Je genauer man Abstände Δx auflösen will, desto höhere Impulse Δp müssen nach der Heisenbergschen Unschärferelation $\hbar \leq \Delta x \cdot \Delta p$ aufgewendet werden.

Die zur Zeit ökonomischste Technik zur Bereitstellung von großen Mengen hochrelativistischer Teilchen besteht darin, diese in evakuiertem Ring zu beschleunigen und annähernd verlustfrei zu speichern. Die Experimente zur Vermessung der Reaktionen umgeben die sogenannten Wechselwirkungszonen. Das sind die Stellen am Ring, an denen die Teilchen kollidieren. Am 31. Mai 1992 ist im Hamburger Forschungszentrum DESY¹ der HERA² Doppelspeicherring mit den Experimenten H1 und ZEUS in Betrieb genommen worden. Erstmals werden hier Protonen mit einem Impuls von 820 GeV/c und 30 GeV/c Elektronen frontal zur Kollision gebracht. Mit der zur Verfügung stehenden Schwerpunktsenergie von 314 GeV können im Proton Strukturen von $\sim 6 \cdot 10^{-19}$ m aufgelöst werden. Diese Energie liegt um eine Größenordnung höher als bei früheren "Fixed Target"-Experimenten, bei denen auf im Labor ruhende Protonen geschossen wird.

Neben der Entdeckung von Unerwartetem, stellen Tests des Standardmodells die absehbaren physikalischen Ziele der Experimente dar. In den tief inelastischen Streuprozessen soll die Substruktur des Protons präzise vermessen werden. Das sind die Strukturfunktionen, die Verteilung der Quarks sowie die Gluondichte im Proton. Bei hoher Energie sind auch erstmals Messungen möglich, in denen der Impulsanteil x eines Protonkonstituenten bis herunter zu 10^{-4} des Protonimpulses reicht. Im gesamten Energiebereich werden Vorhersagen der Quantenchromodynamik untersucht, die überwiegend mit Hilfe der Störungstheorie zu berechnen sind. Die Messung der Impulsverteilung schwerer Quarks (s, c und b) aus der Photon-Gluon-Fusion und der Zerfall der Zwischenprodukte (Mesonen) gehört ebenso zu den Aufgaben des Experimentes wie die Bestimmung der Struktur des Photons. Durch die Möglichkeit an HERA mit polarisierten Strahlen zu arbeiten, sind Untersuchungen zu Asymmetrien beim Austausch elektroschwacher Ströme durchführbar. Die Wechselwirkungszonen bei HERA werden vollständig von Universaldetektoren umgeben, die bei physikalisch interessanten Streuprozessen möglichst alle Reaktionsprodukte

1. DESY = Deutsches Elektronen-Synchrotron
2. HERA = Hadron-Elektron Binganlage

und deren Vierervektoren erfassen sollen. Die beteiligten Primärteilchen weisen ein kinematisches Ungleichgewicht auf. Dieses bedingt einen asymmetrischen Aufbau der Detektoren H1 und ZEUS, der sich bis in die einzelnen Subdetektoren fortsetzt. So besteht der innerste Teil des H1-Detektors aus einem zylindrisch um die Strahlachse aufgebauten zentralen Spurkammersystem, welches in Proton-Flugrichtung durch ein komplexes System von "Vorwärts"-Spurkammern und in entgegengesetzter Richtung durch eine Vieldraht-Proportionalkammer ergänzt ist. Die gasgefüllten Spurkammern werden von einem Kalorimeter zur Energiemessung und einer supraleitenden Spule zur Impulsbestimmung umschlossen. Ein System von Myonkammern schließt den Hauptteil des Detektors nach außen ab.

Vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Entwicklung, Bau und Betrieb universeller Anlagen zur Gasversorgung für das innere Spurkammersystem des H1-Detektors. In der Einführung (2. Kapitel) wird ein knapper Überblick darüber gegeben, wie der HERA Ring funktioniert und welche physikalischen Möglichkeiten erschlossen werden sollen. Danach wird der H1-Detektor vorgestellt. Anhand von einfachen Überlegungen zur Funktion und Meßaufgabe der unterschiedlichen Spurkammern werden erste Anforderungen an das Gasversorgungssystem diskutiert und die Problemstellung vorliegender Arbeit skizziert. Im folgenden Kapitel "3. Das Spurkammersystem" wird gezeigt, wie in den neun verschiedenen Kammertypen jeweils andere Aspekte der Spurvermessung optimiert wurden. Neben einem angepaßten Kammerdesign ist die Versorgung mit einer individuellen Gas Mischung erforderlich. Um den Einfluß des Gases auf das Meßresultat zu verstehen, werden die physikalischen Prozesse in Proportional- und Driftkammern erläutert. Im Hauptkapitel dieser Arbeit "4. Die Anlagen zur Gasversorgung der Spurkammern" werden die wichtigsten Anforderungen konkretisiert und das Grundkonzept der Anlagen entwickelt. Nachdem die Anordnung der diversen Anlagenteile im H1-Gebäude gezeigt worden ist, wird der mechanische Aufbau der Hauptsysteme vorgestellt. Abschließend werden Aufbau, Funktion und Bedienung der Steuerelektronik beschrieben. Die verschiedenen Herstellungsverfahren von Kalibrationsgasgemischen werden im 5. Kapitel dargestellt und auf ihre Verwendbarkeit bei H1 untersucht. Hieraus ergeben sich Aufgaben, die sinnvollerweise innerhalb der Gasversorgungsanlage zu erledigen sind. Die hierzu erstellten Anlagenteile und experimentelle Resultate werden vorgestellt. Das bei den H1-Gassystemen verwendete Konzept zur Kammerdruckregulierung wird im 6. Kapitel diskutiert. Notwendige Drücke und Flüsse im Gassystem sowie die Druckverhältnisse innerhalb des Detektors sind hier die Hauptthemen. Anschließend werden Arbeitsweise und Erfahrungen mit der Druckregulierung der Kammern vorgestellt. Die wichtigsten Möglichkeiten der Gasreinigung werden in "7. Reiniger" kurz beschrieben und auf ihre Verwendbarkeit innerhalb der H1-Gassysteme überprüft. Da erstmalig in geschlossenen Gaskreisläufen für Drift- und Proportionalkammern eine Reinigung von Gasen mit Wasser- und Alkoholdampfzusätzen geplant war, werden notwendige Voruntersuchungen hierzu präsentiert. Aufbau, Funktionsweise und Betriebserfahrungen mit den im H1-Experiment eingesetzten Anlagen bilden den Abschluß dieses Kapitels. Einführend wird im 8. Kapitel die Notwendigkeit einer Qualitätsüberwachung der Kammergase dargestellt. Eine Auswahl physikalischer Methoden hierzu wird diskutiert und zusammenfassend bewertet. Hieraus wird ein Konzept zur Gasanalytik entwickelt und abschließend werden die Resultate mit den eingesetzten Meßinstrumenten vorgestellt.

2. Einführung

Bevor der Aufbau des H1-Detektors erläutert wird, ist ein knapper Überblick darüber nötig, wie HERA funktioniert und welche physikalischen Möglichkeiten erschlossen werden sollen. Am Beispiel einiger zu erwartender Prozesse werden die Anforderungen an die Meßapparaturen erläutert und anschließend der H1-Detektor vorgestellt. Besonders berücksichtigt wird das innere Spurkammersystem, da sich vorliegende Arbeit mit Entwicklung, Bau und Betrieb der zugehörigen Gasversorgungsanlagen beschäftigt. Anhand einfacher Überlegungen lassen sich erste Anforderungen an diese Anlagen ableiten und die Problemstellung vorliegender Arbeit wird skizziert.

2.1 HERA

HERA ist die weltweit erste Speicherringanlage, in der die wichtigsten Bausteine der uns umgebenden Materie, Elektronen e^- und Protonen p , frontal aufeinander geschossen werden. Abb. 2.1 zeigt die Dimensionen der 6,3 km langen Ringe und Vorbeschleuniger, deren Designparameter in Tab. 2.1 zusammengefaßt sind.

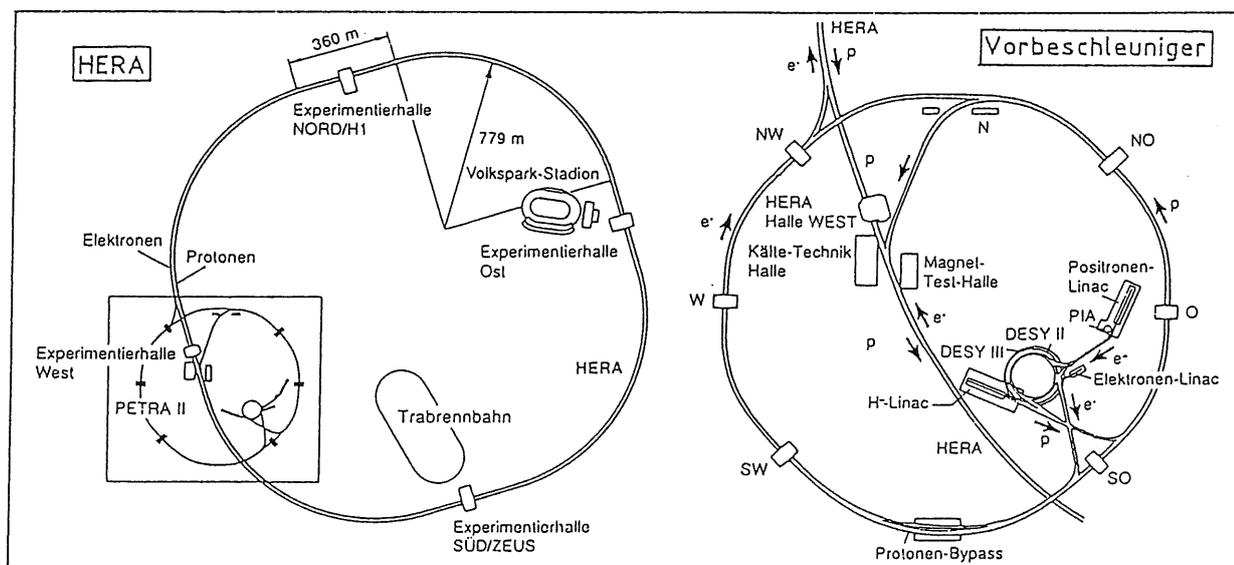


Abb. 2.1: Die HERA-Speicherringe und Vorbeschleuniger aus [SCH90]

Nach dem Einschub in HERA werden die Teilchen auf Nominalenergie beschleunigt und dabei in immer dichter werdenden Paketen für Stunden gespeichert. Im Bereich der Experimentierhallen laufen beide Strahlen durch eine gemeinsame Strahlröhre, um exakt frontal zu kollidieren.

Endenergien der Vorbeschleuniger:		e^-	p
e^- -Linac / H^- -Linac	[MeV]	200	50
DESY II / DESY III	[GeV]	7	7,5
Petra II	[GeV]	14	40
HERA:			
✓ Endenergie	[GeV]	30	820
Energieverlust pro Umlauf	[MeV]	125	$6 \cdot 10^{-6}$
✓ Strahlstrom in HERA	[mA]	60	160
✓ Anzahl der Pakete		210	210
Teilchen pro Paket		$3,5 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{11}$
Länge der Pakete	[cm]	3,0	4,4
Strahlprofil horizontal/vertikal	[μm]	264 / 17	300 / 95
Schwerpunktsenergie		314 GeV	
✓ Luminosität		$1,5 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$	
Kollisionsrate		10,4 MHz	
Strahlkreuzungswinkel		0 mrad	

Tab. 2.1: Designparameter der Vorbeschleuniger und des Doppelspeicherrings HERA aus [PDG92, SCH90]

Wichtige Kenngröße eines Speicherrings ist die Luminosität L . Sie gibt an, wieviele Reaktionen pro Zeiteinheit R mit einem Wechselwirkungsquerschnitt σ erzeugt werden.

$$L = R/\sigma$$

Je höher die Luminosität ist, desto wahrscheinlicher sind physikalisch interessante Prozesse mit kleinem Wirkungsquerschnitt beobachtbar. Um die angestrebte Luminosität von etwa 200 pb^{-1} pro Jahr¹ zu erreichen, sollen in HERA je 210 e^- und p Pakete eingefüllt werden. Unter diesen Bedingungen finden alle 96 ns Kollisionen an den Wechselwirkungs-zonen statt. Um die zur Verfügung stehende Luminosität meßtechnisch voll auszunutzen, müssen die Detektoren an diese kurzen Zeitabstände angepaßt werden.

Um die hohen Führungsfelder von 4,7 Tesla für Protonen zu erzeugen, ist dieser Ring mit supraleitenden Spulen, einer Weiterentwicklung der "Tevatron Magnete" am FNAL², ausgestattet. Ebenso wie die Dipolmagnete sind Fokussier-, Korrektur- und die Hauptmagnete der Experimente in supraleitender Technik ausgeführt. Mit einer Kälteleistung von 6 MW ist direkt neben der Experimentierhalle West Europas größte Heliumkälteanlage entstanden. Mit einer Gesamtmenge von 15.000 kg flüssigem Helium werden die Magnete des kompletten Rings auf eine konstante Temperatur von 4,4 K abgekühlt [LIN01].

Da Elektronen 1836 mal leichter als Protonen sind, sind die Führungsfelder mit normalleitenden Spulen zu realisieren. Hier müssen durch eine leistungsfähige HF-Beschleuniger-

1. $1 \text{ pb} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ barn} = 1 \cdot 10^{-40} \text{ m}^2$

2. FNAL = Fermi National Accelerator Laboratory, Chicago, USA

anlage (10 MW) mit zum Teil supraleitenden Hohlraumresonatoren die enormen Synchrotronstrahlungsverluste ausgeglichen werden, die bei gegebenem Maschinenradius mit der vierten Potenz der Elektronenenergie ansteigen (s. Tab. 2.1).

Ein positiver Effekt der Synchrotronstrahlung in dieser Anordnung ist, daß der e^- -Strahl zu einem hohen Prozentsatz parallel zum Dipolfeld polarisiert wird. Durch "Spin"-Rotatoren soll die Polarisationsrichtung der e^- entgegen bzw. in Flugrichtung ausgerichtet werden. Das physikalisch Interessante an diesem Verfahren ist, daß Prozesse der schwachen Wechselwirkung damit ein- bzw. ausgeschaltet werden können. Diese können nach gültiger Theorie nur dann stattfinden, wenn der Spin des e^- antiparallel zu seiner Bewegungsrichtung orientiert ist.

2.2 Physik an HERA

Die zur Zeit modernsten Experimentieranlagen in Europa mit vergleichbarer Energieskala – HERA und LEP³ im CERN⁴ – liefern komplementäre physikalische Informationen. Vernichtungsexperimente wie bei LEP (e^+/e^- , 90 GeV) analysieren das Vakuum und seine virtuellen Teilchenzustände als "zeitartigen" Prozeß, während bei Streuexperimenten der Inhalt der beteiligten Teilchen "raumartig" vermessen wird. Der große Impulsübertrag zwischen Elektron und Proton von bis zu $Q^2 \cong 10^5 \text{ GeV}^2/c^2$ macht HERA zu einem Elektron-Quark-Kollider. In der Region oberhalb von $Q^2 \cong 10^4 \text{ GeV}^2/c^2$ werden die Beiträge von elektromagnetischer Wechselwirkung und von schwachen Prozessen in gleicher Größenordnung zur Streuung beitragen [EIW92].

Die e^-/p -Wechselwirkung läßt sich mit dem Partonmodell [FEY72] beschreiben. Bei der tiefinelastischen Streuung wechselwirkt ein Parton mit dem Bruchteil x des Protonimpulses mit dem einlaufenden Elektron über den Austausch eines neutralen "NC"⁵ oder geladenen Stromes "CC"⁶. Die restlichen Partonen nehmen nach diesem Modell nicht an der Wechselwirkung teil. Bei NC-Reaktionen wird das Elektron durch Austausch eines Photons γ (Vermittler der elektromagnetischen Wechselwirkung) oder eines Z^0 -Bosons (Vermittler der schwachen W.W.) gestreut (Abb. 2.2.a). Bei CC-Reaktionen wird das Elektron durch Austausch eines W^\pm -Bosons in ein Neutrino ν umgewandelt (Abb. 2.2b). Der hadronische Endzustand besteht im einfachsten Fall aus zwei Jets⁷. Das gestreute Parton q fragmentiert in den "Stromjet", während der Rest des Protons in den "Zuschauerjet" fragmentiert. Innerhalb des kinematischen Limits von $E_{\text{cms}} = 314 \text{ GeV}$ können auch neue Zustände mit elektromagnetischer und/oder schwacher Ladung – sofern es sie geben sollte – erzeugt werden. Der nächst interessantere Prozeß ist die Photon-Gluon-Fusion, der dominante Prozeß zur Erzeugung von Quark-Antiquark-Paaren $Q\bar{Q}$ (Abb. 2.2c). Hierbei wechselwirken ein vom Elektron abgestrahltes Photon γ mit einem vom Proton abgestrahlten Gluon g . Als Reaktionsprodukte erhält man hier das auslaufende Elektron, die beiden oben erwähnten Jets und die vom $Q\bar{Q}$ -Paar erzeugten Jets.

3. LEP = Large Electron Proton Collider

4. CERN = Centre Européen pour la Recherche Nucléaire, Genf, Schweiz

5. NC = engl. Abk. für neutral current

6. CC = engl. Abk. für charged current

7. Jet = engl. Ausdruck für ein eng kollimiertes Bündel aus Teilchen

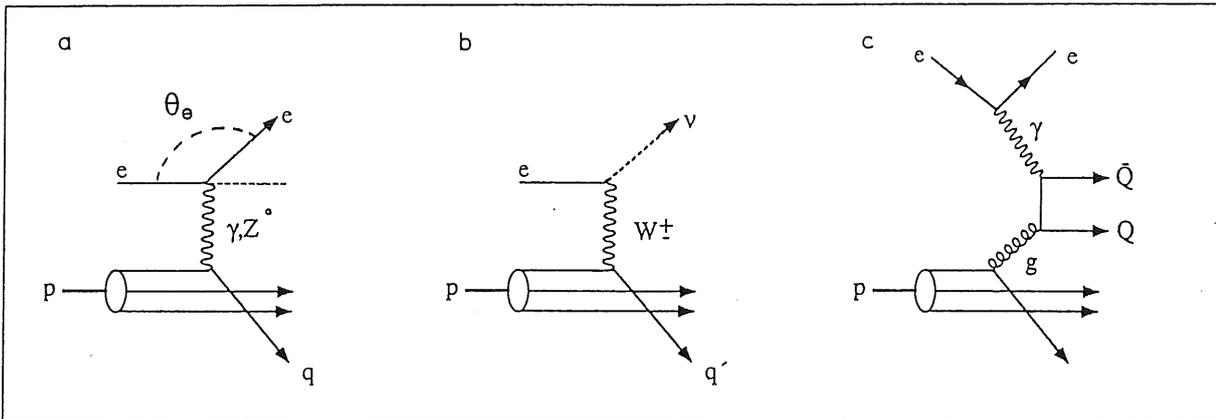


Abb. 2.2: Feynman Diagramme für tief inelastische Streuung durch Austausch eines neutralen Stromes (a), eines geladenen Stromes (b) und Diagramm für Photon–Gluon–Fusion (c) (aus [EIW92])

Die Grundlage der Kinematik der tief inelastischen Lepton–Nukleon Streuung ist die Energie und Impulserhaltung. Quantitativ lassen sich die Ereignisse durch einen Satz von sechs Variablen⁸ beschreiben, von denen jeweils zwei ausreichen, um die Kinematik eindeutig zu bestimmen. Konventionsgemäß sind das in der tief inelastischen Streuung entweder x oder y und Q^2 .

$$Q^2 = 4E_e E_e' \cos^2\left(\frac{1}{2}\theta_e\right),$$

$$y = 1 - (E_e'/E_e) \sin^2\left(\frac{1}{2}\theta_e\right),$$

$$x = Q^2/sy$$

Hierbei ist θ_e der Streuwinkel des Elektrons und E_e, E_e' seine Energie vor bzw. nach dem Stoß. Q^2 ist das Quadrat des Impulsübertrages auf das Proton und s ist das Quadrat der Schwerpunktsenergie.

Am Beispiel der Streuung nach Abb. 2.2a,b läßt sich die Bestimmung dieser Parameter einfach erklären. Der Zuschauerjet liegt wegen des Impulsungleichgewichtes der Stoßpartner vollständig in einem schmalen Winkel in Protonflugrichtung und kann in der Strahlröhre nicht nachgewiesen werden. Für das NC–Ereignis genügt die Energie E_e' und Streuwinkelmessung θ_e des auslaufenden e^- . Beim CC–Ereignis müssen Energie und Winkel des Stromjets vermessen werden, da das Neutrino keine Wechselwirkung im Detektor macht und somit nicht nachgewiesen werden kann. Die Formel für Q^2 wird in diesem Fall durch die Protonenergien und deren Streuwinkel ausgedrückt.

$$y_h = \frac{\sum E_h - \sum p_{z,h}}{2E_e}$$

E_h ist die Summe über alle hadronischen Endzustände und $p_{z,h}$ sind deren Impulse in Protonrichtung [H1C01]. Vorausgesetzt wird hierbei, daß die Transversalimpulse von Stromjet und gestreutem Neutrino identisch sind.

8. zu Variablen und Kinematik bei HERA siehe [LOH83, WOL86, H1C01]

Folgende Schwerpunkte für die Messungen an HERA wurden festgelegt:

- QCD-Tests, Struktur des Protons und des Photons sowie Bestimmung der Gluondichte
- Untersuchungen an schweren Quarks (s , c und b)
- Suche nach neuen Teilchen und Strömen

Aufgrund unterschiedlicher Kinematik ergeben sich dabei auch unterschiedliche Anforderungen an die Detektoren, wie im folgenden kurz umrissen wird.

Die Strukturfunktionen des Protons wurden im Bereich bis $Q^2 = 300 \text{ GeV}^2$ vermessen. Das von der QCD vorhersagbare Verhalten wird mit präzisen Messungen der Quarkverteilungen bei HERA mit 100-fach höherer Energie quantitativ getestet. Eventuell meßbare Abweichungen könnten ihre Ursachen in einer Substruktur von e^- bzw. q haben; d.h. die inelastische Streuung an einer Struktur würde in eine elastische Streuung an ihren Konstituenten übergehen. Hohe Impulsüberträge bedeuten schmale Jets mit hochenergetischen Teilchen. Während das Kalorimeter möglichst lückenlos und fein granuliert Winkel und Energie vermessen muß, wird das Spurkammersystem zu exakten Topologiestudien benötigt. Besonders ein guter Leptonnachweis und eine hohe Doppelspurauflösung unterstützen die Zuordnung von geladenen Spuren zu Schauern im Kalorimeter.

Bei HERA können Ereignisse vermessen werden, bei denen der Impulsanteil eines Protonkonstituenten bis zu 100-fach kleiner als bei früheren Experimenten ist. Um diese Ereignistypen vollständig zu erkennen, müssen die Spurenkammern des H1-Detektors besonders in einem kalorimetrisch verhältnismäßig schlecht ausgestatteten Bereich die Energie- und Winkelauflösung verbessern.

Eine wichtige Rolle zur Quantifizierung der Elemente der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa Matrix wird die Produktion schwerer Quarkpaare $s\bar{s}$, $c\bar{c}$ und $b\bar{b}$ spielen. Die Massengrenze für das Top-Quark liegt vermutlich bei $175 \text{ GeV}/c^2$ [CDF94], also oberhalb des kinematischen Limits von HERA. Die Impulsüberträge bei der Photon-Gluon-Fusion sind naturgemäß klein. Weiterhin zerfallen die gebildeten Paare semileptonisch, was in auflaufenden breiteren Jets inklusive Leptonen mit kleinem Transversalimpuls resultiert. Da die kalorimetrische Auflösung mit fallender Energie abnimmt, können die Kammern mit Hilfe der Energieverlustmessung geladener Teilchen deren Identifikation unterstützen.

Die Suche nach rechtshändigen schwachen Strömen, die durch einstellbare Polarisationsrichtung der e^- untergrundsarm nachgewiesen werden könnten, ist eine der Möglichkeiten, die Erweiterung und Erklärung des Standardmodells voranzutreiben. Weitere aktuelle theoretische Modelle sind der Higgsformalismus, Supersymmetrie und Leptoquarks [CAS84]. Auch hier sind die Endzustände der Ereignisse multileptonisch und/oder hadronische Jets, so daß eine gute Leptonidentifizierung besonders angezeigt ist.

Zusammenfassend stellt die mögliche Physik an HERA folgende Anforderungen an die Detektoren:

- hermetische, hochauflösende elektromagnetische und hadronische Kalorimetrie zur Winkel und Energiemessung
- gute Leptonidentifikation, besonders e^- und μ Nachweis in der Nähe der Beamachse zur Luminositätsmessung und Triggerung
- hohe Spurauflösung zur Topologiebestimmung besonders in p -Richtung

2.3 Der H1–Detektor

Unter Beteiligung von Physikern aus 73 internationalen Instituten wurden 2 Vorschläge für Meßapparaturen an HERA vorgestellt⁹ und 1986 vom PRC¹⁰ am DESY genehmigt. 1988 begann der Aufbau der technisch und wissenschaftlich sich ergänzenden Universal-detektoren H1 in der Experimentierhalle Nord, sowie ZEUS in Halle Süd (vergl. Abb. 2.1). Sie bestehen aus einer Reihe von spezialisierten Einzeldetektoren, die den Wechselwirkungspunkt schalenförmig umgeben. Damit werden die geladenen Reaktionsprodukte der e^-/p -Kollisionen direkt und die neutralen indirekt nachgewiesen. Typisch für diese Detektoren ist ihr asymmetrischer Aufbau, der das Impuls–Ungleichgewicht der primären Teilchen (e^- : 30 GeV/c, p : 820 GeV/c) widerspiegelt. Aus Simulationsrechnungen war bekannt, daß über 50% der bei der tief inelastischen Streuung entstehenden Teilchen in einem schmalen Raumwinkel von kleiner 25° in den Vorwärtsbereich emittiert werden. "Vorwärts" entspricht der Richtung des Protonenstrahls. Am Beispiel des H1–Detektors (Abb. 2.3) soll der Aufbau von innen nach außen sowie die Funktionsweise der wesentlichen Komponenten erläutert werden.

②+③ Spurkammersysteme

Sie bestehen aus gasgefüllten Drahtkammern in Leichtbauweise, um störende Einflüsse durch Vielfachstreuung an den Wänden und innerhalb der Kammern gering zu halten. Für die Energiemessung mit dem sich anschließenden Kalorimeter muß der Energieverlust und ein Aufsichauen der Teilchen minimiert werden.

Der Zentralteil besteht aus zwei Jetkammern mit je einer Z–Driftkammer und einer Viel-draht–Proportionalkammer ("MWPC")¹¹. In Rückwärtsrichtung befindet sich eine weitere MWPC, deren Drahtebenen senkrecht zur Strahlrohrachse \perp orientiert sind. Den Vorwärtsteil bilden drei identische "Supermodule" mit je drei Lagen planarer Drift– sowie Proportionalkammern, gefolgt von einem Modul zur Erzeugung von Übergangsstrahlung und einer radialen Driftkammer (vergl. Abb. 2.4).

Die Aufteilung des Meßvolumens in individuelle Subdetektoren mit spezifischen Meßaufgaben wurde gewählt, um möglichst viele Aspekte der Spurvermessung optimal zu erfassen. Die MWPCs bilden ein der Ereignis–Topologie angepaßtes System für einen schnellen Trigger. Die Driftkammern gewährleisten mit einer guten Ortsauflösung ($100 \mu\text{m} < \sigma < 350 \mu\text{m}$) eine präzise Rekonstruktion der Teilchenspuren inklusive Ladungsvorzeichen– und Transversalimpulsbestimmung ($\sigma/p < 0.003 p$). Durch eine vielfache Messung des Energieverlustes ("sampling") wird besonders bei niedrigen Energien die Teilchen–Identifikation ermöglicht. Speziell im Vorwärtsteil dient die zusätzliche Detektion von Übergangsstrahlung in der Radialen Driftkammer zum klaren Erkennen von Elektronen ($e/\pi = 1\%$).

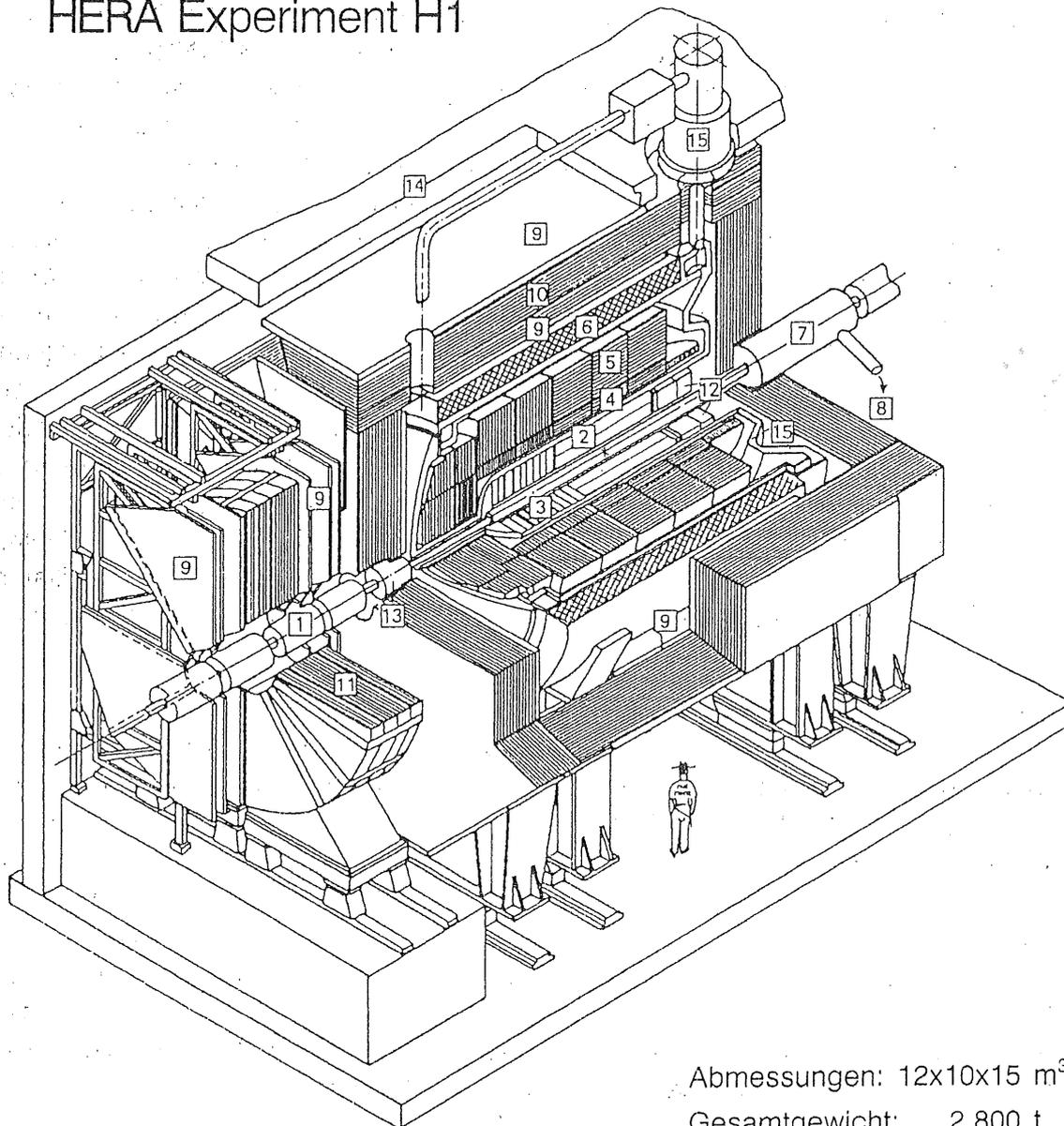
Eine optimale Arbeitsweise dieser verschiedenartigen Kammern und der Radiatoren ist eng mit einer individuell optimierten Gasversorgung gekoppelt [diese Arbeit].

9. "Letter of intend for an experiment at HERA", 28. Juni 1985

10. PRC = Physics Research Committee

11. MWPC = engl. Abk. für Multiwire Proportional Chamber

HERA Experiment H1

Abmessungen: 12x10x15 m³

Gesamtgewicht: 2.800 t

- | | |
|---|---|
| 1 Strahlrohr und Strahlmagnete | 8 Helium Kälteanlage |
| 2 Zentrale Spurkammern | 9 Myon-Kammern |
| 3 Vorwärts-Spurkammern, Übergangsstrahlungsmodule | 10 Instrumentiertes Eisen (Streamer-Röhren) |
| 4 Elektromagnetisches Kalorimeter | 11 Myon-Toroid-Magnet |
| 5 Hadronisches Kalorimeter | 12 warmes elektromagnetisches Kalorimeter |
| 6 Supraleitende Spule (1,2 T) | 13 Vorwärts-Kalorimeter |
| 7 Kompensationsmagnet | 14 Betonabschirmung |
| | 15 Flüssigargon Kryostat |

Abb. 2.3: Schnittbild des H1-Detektors in isometrischer Projektion aus [DES89]

4 + 5 Kalorimeter

Der komplette Vorwärts- und Zentralteil ($4^\circ < \theta < 152^\circ$) dieses "Sampling"-Kalorimeters ist in einem Kryostaten untergebracht. Als Absorber dienen Stapel von Platten, die im inneren, elektromagnetischen Teil aus Blei, im hadronischen Teil aus Edelstahl sind. Die Ionisation in den dazwischen liegenden, flüssigen Argonschichten wird über fein segmentierte Leiterplatten ausgelesen. Im elektromagnetischen Teil werden Elektronen und Photonen vollständig absorbiert und deren Richtung und Energie soll mit einer Auflösung von $\sigma/E \cong 10\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$ gemessen werden. Im hadronischen Teil wird die Energie der stark wechselwirkenden geladenen Pionen und Hadronen bestimmt. Zur Kompensation des inherent unterschiedlichen Ansprechverhaltens des Kalorimeters auf elektromagnetische und hadronische Schauer muß die gesampelte Energie nachträglich mit dem gemessenen Schauerprofil gewichtet werden. Die resultierende Pion-Elektronentrennung des Kalorimeters liegt im Bereich von 10^{-3} und die Energieauflösung des hadronischen Teils beträgt $\sigma/E \cong 55\%/\sqrt{E} \oplus 2\%$. Dieses Konzept ermöglicht durch feine Granularität und hohe longitudinale Segmentierung eine nahezu lückenlose Winkel- und Energiemessung. Weitere Vorteile dieser Technik sind eine zeitlich stabile Energieeichung sowie eine hohe Strahlungsresistenz. Ein "Plug"-Kalorimeter [13](#) (Kupferplatten mit Silizium Detektoren) im Vorwärtsbereich ($0,7^\circ < \theta < 3,5^\circ$) und ein elektromagnetisches Blei-Szintillator-Sandwich [12](#) im Rückwärtsbereich ($152^\circ < \theta < 176^\circ$) vervollständigen die Energiemessung.

6 Spule

Der 5,75 m lange supraleitende Solenoid umschließt das Kalorimeter und stellt im Innern ein Magnetfeld von 1,2 Tesla in Strahlrichtung zur Verfügung. Geladene Teilchen werden in diesem Feld auf Helixbahnen abgelenkt. Nach Vermessen dieser Spuren wird aus der Krümmung selbst der transversale Impuls und aus der Richtung der Krümmung das Ladungsvorzeichen bestimmt. Diese Anordnung zeichnet sich aus durch das sehr homogene Magnetfeld im kompletten Bereich der Spurkammern. Eine gute Impulsbestimmung der Myonen wird wegen der langen Wegstrecken im Feld erreicht. Weil die Spule außerhalb des Kalorimeters angeordnet ist, sind gute Voraussetzungen für eine Identifikation und Energiebestimmung der Leptonen geschaffen. Der Einfluß der Spule auf die HERA-Strahlen wird mit einem Kompensationsmagneten [7](#) korrigiert.

10 Eisenstruktur

Diese dreigeteilte, fahrbare Konstruktion umschließt und hält mechanisch alle bisher erwähnten Komponenten und dient als Rückflußloch für den magnetischen Fluß des Solenoids. Die Struktur besteht aus 7,5 cm dicken Eisenplatten mit Zwischenlagen aus Plastik-Streamer-Röhren. Diese bilden eine Fortsetzung des hadronischen Kalorimeters und vermessen die Restenergie der dort nicht vollständig absorbierten hochenergetischen Teilchen.

9 + 11 Myonkammern

Da Myonen nur schwach wechselwirken, können sie ohne Absorption die Materialien durchdringen und über Ionisationsverluste im Detektoraußenbereich nachgewiesen werden. Der Hauptteil dieser großflächigen Driftkammern besteht aus drei kompletten Lagen

12. " θ " = Polarwinkel; 0° bedeutet in Richtung des Protonstrahls = z-Richtung

vor, innerhalb und außerhalb der Eisenstruktur und wird für kleine Winkel durch ein Vorwärtsspektrometer 11 bestehend aus Toroidmagnet und Driftkammerlagen ergänzt.

Kleinwinkeldetektoren

Im Abstand von bis zu 107 m vom Hauptdetektor befinden sich Nachweisgeräte in e^- -Richtung zur "on-line" Luminositätsmessung und e^- -Verfolgung.

2.4 Spurkammern und Gas

Meßprinzip der Kammern

Geladene, hochrelativistische Teilchen ionisieren längs ihrer Flugbahn das Gasvolumen in einer Kammer. Röntgenphotonen, hier insbesondere die der Übergangsstrahlung, ionisieren durch Photoeffekt einzelne Atome bzw. Moleküle der Gasfüllung. Unter dem Einfluß von elektrischen und magnetischen Feldern driften die entstandenen Elektronen und Ionen zur Anode bzw. Kathode. Im hohen elektrischen Feld um die typisch 20 bis 50 μm dicken Anodendrähte findet eine durch Stoßionisation erzeugte Ladungsträgervielfachung statt, die zu einem auslesbaren Signal der am Draht gesammelten Elektronen führt. Ionisationsdichte, Driftgeschwindigkeit und Gasverstärkungsfaktor hängen bei gegebener Feldkonfiguration direkt von der Gaszusammensetzung ab.

Aus der gemessenen Zeitdifferenz zwischen Teilchendurchgang und Anodensignal wird mit Hilfe der Driftgeschwindigkeit der Ort des Durchgangs berechnet. Aus der Form des Signals kann auf Anzahl und Energieverlust des/der Primärteilchen geschlossen werden. Durch Verbindung der gemessenen Orte wird die Teilchenspur rekonstruiert. Wie oben beschrieben (Spule) kann daraus das Ladungsvorzeichen und der Impuls bestimmt werden.

Mechanischer Aufbau

In Abb. 2.4 ist oben ein Längsschnitt durch das Spurkammersystem des H1-Detektors abgebildet. Der Vorwärts- und der Zentralteil sind darunter getrennt in einem Schnitt senkrecht zur Strahlachse dargestellt.

Der Zentralteil besteht aus sechs ineinander geschobenen zylinderförmigen Kammern. Die dünnen Zwischenwände definieren die Lage der Kathoden. Bei den beiden Jetkammern und MWPCs nehmen diese die mechanische Zugspannung der Drähte zwischen den Endflanschen auf. Die Drähte der Z-Kammern sind polygonförmig senkrecht dazu gespannt. Zwischen den verschiedenen Gasvolumina der kleinen Kammern ist aus mechanischen Gründen nur eine Druckdifferenz von wenigen hPa (= mbar) erlaubt.

Der Vorwärtsteil ist aus zwölf hintereinanderliegenden, flachen Zylinderkammern aufgebaut. Die Drahtspannungen werden innen von einem kohlefaserverstärkten Zylinder und außen von einem Aluminiumzylinder aufgenommen. Die hohe Anzahl von Zwischenwänden in Flugrichtung der Teilchen aus dem Wechselwirkungspunkt macht eine drastische Minimalisierung der Materialstärken unumgänglich. Neben den Aufgaben – Gastrennung und Halterung für Kathodenstreifen – müssen speziell die Trennwände zwischen dem "Radiator" und der "Radial" Driftkammer transparent für Übergangsstrahlungsphotonen sein. Sie bestehen daher aus 50 μm dicken Mylarfolien und die mechanisch tolerierbare Druckdifferenz beträgt hier nur etwa 5 Pa (= 50 μbar).

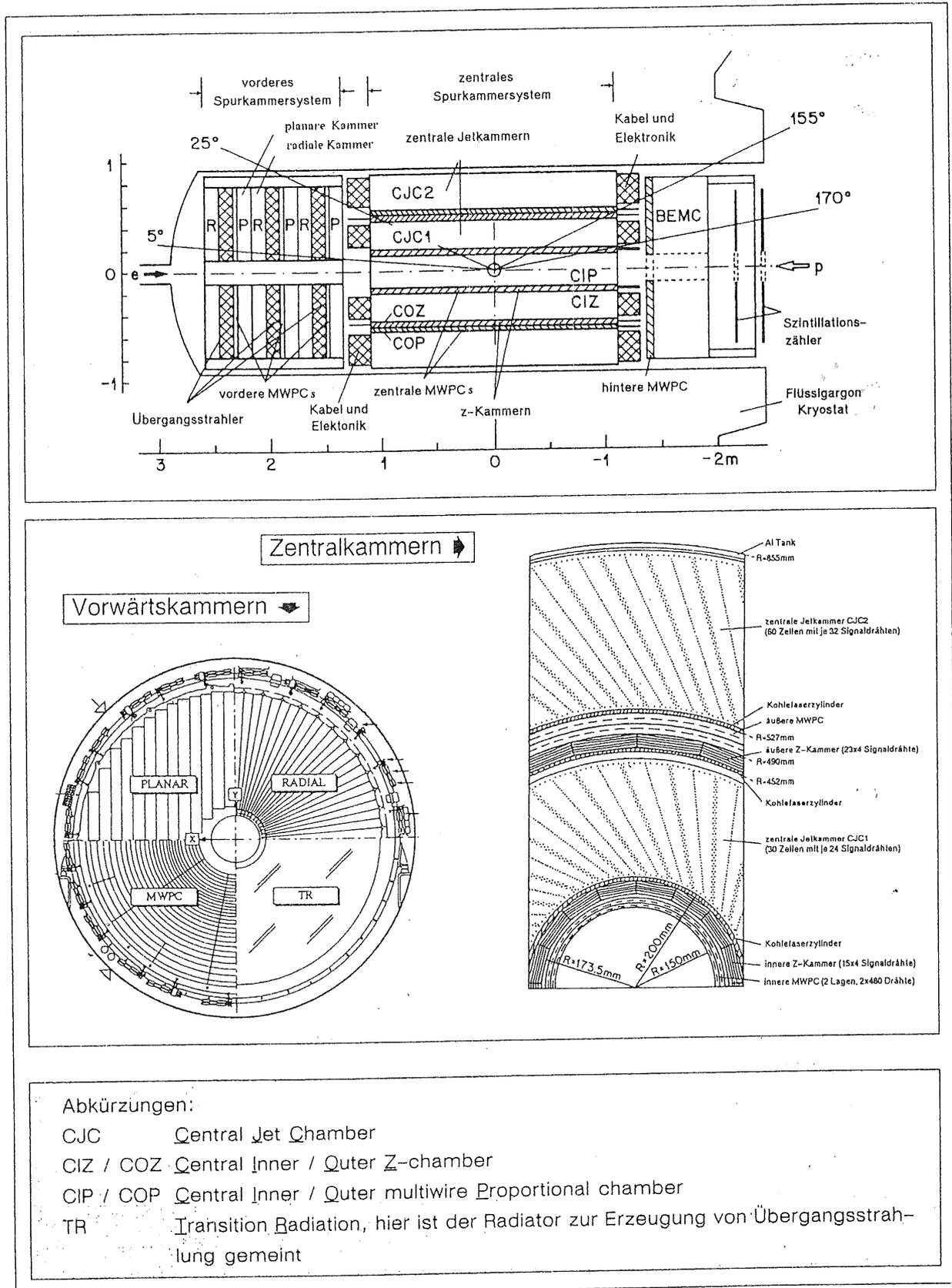


Abb. 2.4: Das innere Spurkammersystem: r-z Projektion (oben) und x-y Projektionen (unten) aus [H1C03]

Meßaufgaben der Einzeldetektoren

Die Aufgabe der Messung der genauen r - ϕ -Koordinate und der präzisen Bestimmung der z -Koordinate ist im Zentralbereich auf verschiedene Kammern aufgeteilt. Im Vorwärtsbereich besteht eine ähnliche Aufgabenteilung. Hier sind aus geometrischen Überlegungen die Koordinate ϕ und x - y zusammen mit der Richtung θ von den Radialen bzw. den Planaren Driftkammern exakt zu vermessen. Die in den jeweiligen Kammern optimierten Aspekte der Spurvermessung sind in Tab. 2.2 aufgelistet. Zum Erreichen der meßtechnischen Ziele wurden sowohl unterschiedliche Kammerdesigns verwendet als auch die Gase den individuellen Anforderungen angepaßt.

Name	Funktion	Auflösung	Bemerkungen
CJC 1 + CJC 2	genaue r - ϕ -Messung moderate z -Best. Doppelspurauflösung Energieverlust dE/dx	100 μm 24 mm 2,5 mm 6%	senkrecht zu den Drähten parallel zu den Drähten Pulsintegral
CIZ, COZ	genaue z -Messung grobe r - ϕ -Messung Doppelspurauflösung	350 μm 10/25 mm 3,5 mm	senkrecht zu den Drähten entlang der Drähte
CIP, COP	Trigger und t_0	< 96 ns	2 x Streifenauslese
B-MWPC	Trigger und t_0	< 96 ns	4 Drahtebenen, um $\phi = 45^\circ$ verschoben
Radiale	genaue ϕ -Messung moderate r - ϕ -Messung moderates dE/dx gute e^-/π -Trennung	150 μm $e/\pi < 1\%$	senkrecht zu den Drähten entlang der Drähte Pulsintegral Übergangsstrahlung "TR"
Planare	genaue x - y (und θ) M., Doppelspurauflösung	150 μm 2 mm	3 Ebenen um $\phi = 60^\circ$ versch.; senkrecht zu den Drähten
F-MWPC	Trigger und t_0	< 96 ns	2 x Streifenauslese
Radiatoren	Erzeugung von "TR"	--	400 Folien (Polypropylen)

Tab. 2.2: Designparameter des Spurkammersystems aus [H1C02, H1C03]

Gasversorgung

Da sich eine optimale Arbeitsweise nur durch individuelle Gasmischungen in den einzelnen Kammern erreichen läßt, sind die Kammern gasdicht voneinander getrennt. Mit den bisherigen Informationen und anhand einfacher Überlegungen lassen sich schon einige Anforderungen an die Anlagen zur Gasversorgung formulieren.

○ Druck und Fluß

Das notwendige Angleichen des Kammerinnendruckes an den Umgebungsluftdruck erfolgt durch Regelung des Kammerein- bzw. Ausflusses. Bei den Ionisationsvorgängen innerhalb der Kammern kommt es bei hohen Reaktionsraten zu Anhäufungen von Ionen an den Elektroden. Zum Abtransport dieser Produkte und zur Homogenisierung des Gasraumes ist ein Gasaustausch durch Fluß notwendig.

○ Xenon Problem

Xenon soll als Zählgas in den Radialen und eventuell in den Jetkammern verwendet werden. Da dieses Gas sehr teuer ist, muß es in geschlossenen Kreisläufen zirkulieren. Durch unvermeidliche Lecks in Versorgungs- und Kammersystem, häufen sich unerwünschte Gaskomponenten aus der Luft oder benachbarten Kammern an. Ein System zur Gasreinigung muß Abhilfe schaffen.

○ Aging

Kammerngasen bestehen aus Kohlenwasserstoff-Edelgasgemischen. Die bei der Gasverstärkung gebildeten Ionen bestehen teilweise aus polymerisationsfähigen Kohlenwasserstoffresten. Bei hohen Strahlungsbelastungen des Kammerngases wie sie im Experiment auftreten werden in der langen Betriebszeit Ablagerungen an Anoden und Kathoden befürchtet, die zu verminderter Funktionsfähigkeit der Detektoren führen. Von einigen Kammerbetreibern wird daher eine Möglichkeit zur Beimischung von Additiven wie Wasser- oder Alkoholdampf gewünscht, die diese Alterungsprozesse (engl.: aging) verhindern oder wenigstens verlangsamen sollen.

○ Langzeitstabilität

Die Gaszusammensetzung muß während einer Meßperiode möglichst konstant gehalten werden, da Abweichungen eine neue Kalibration der Kammern erfordern. Geräte der Gasversorgungsanlage sowie Druck und Temperatur des Gases in den Kammern müssen ständig überwacht werden. Weiterhin erforderlich sind Geräte zur Gasanalyse, die die Zusammensetzung der Hauptkomponenten wie auch Verunreinigungen monitoren.

○ Sicherheit

Das Gasvolumen des Spurrkammersystems beträgt ca. 8000 l brennbares Gas. Aufgrund der mechanischen Konstruktion ist im Falle von Leckagen oder anderen Defekten in Nähe der Kammern ein schnelles Evakuieren nicht möglich. Als erster Explosionsschutz ist eine permanente Inertgasspülung (N_2) für den Raum zwischen Kammern und Kryostat implementiert. Zusätzliche Gasvolumina der Gasversorgungssysteme und der Versorgungsleitungen stellen ein zu sicherndes Gefahrenpotential dar. Ein komplexes System zur Sicherheit der Menschen, technischen Einrichtungen und der Kammern selbst ist unumgänglich.

In Tab. 2.3 sind die oben erwähnten Aspekte als Anforderungen an eine Gasversorgung zusammengestellt.

Stichwort	Anforderung	Parameter
Mechanik	Druckreglung	mbar (CT), μ bar (FT)
Einzeldetektoren	unabhängige Kreisläufe	2xCJC + 5xCT + 4xFT
Fluß	Durchspülmöglichkeit	1-4 x Kammervol./Tag
Xenon	geschlossene Kreisläufe + Reiniger	2xCJC, 2xFT
Aging	Zusatz von Additiven Alkohol/Wasser	0,2 bis 2%
Langzeitstabilität	Überwachung Gaszusammensetzung	besser als Vol%
Sicherheit	Detektion von Lecks	unabhängige Systeme

Tab. 2.3: Kriterien zum Entwurf der Gasversorgung der inneren H1-Spurrkammern

○ Was ist neu?

Das Gesamtkonzept der Gasversorgungsanlage sollte aus hochgradig vereinheitlichten Modulen aufgebaut werden, was sich in Aufbau, Ersatzteil-Lagerhaltung und Bedienungs-freundlichkeit positiv auswirkt. Bei dieser universellen Bauweise sollten die einer indivi-duellen Gasversorgung abträglichen Kompromisse möglichst vermieden werden.

Unter Berücksichtigung der mechanischen Kopplung der Einzelvolumina muß die Druckkre-gelung so konzipiert werden, daß einzelne Kammern mit unterschiedlich dichter Gaszu-sammensetzung unabhängig voneinander geregelt werden können.

Beim Design und Aufbau von Reiniger- sowie Alkoholbeimischungs-Anlage müssen neue Wege beschritten werden, da ein gleichzeitiger Betrieb dieser Komponenten im geschlos-senen Gaskreislauf bisher noch nicht praktiziert wurde.

Die hohe Anzahl von verschiedenen und im Laufe der Zeit wechselnden Gasgemischen macht es sinnvoll, ein universelles und flexibles Instrument zur Gasqualitätsüberwachung ins Konzept aufzunehmen. Dieser Anlagenteil sollte im automatischen Betrieb die qualitati-ve und quantitative Gaszusammensetzung aller H1 Drahtkammern messen und monito-ren. Die Ziele dieser Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Eigenschaften der Gase im Hinblick auf optimierte Kammerfunktion
- Design und Funktionsweise der Gasversorgungsanlagen
- Realisierung in Mechanik sowie elektronischer Hard- und Software
- Herstellung der Gasmischungen inklusive der Wasser- und Alkoholbeimischung
- Druck und Fluß in den Kammern
- Reinigeranlagen für geschlossene Gaskreisläufe
- Gasqualitätsüberwachung

3. Spurkammersystem

Wie in Tab. 2.2 gezeigt, sind die inneren Spurkammern im H1-Detektor auf unterschiedliche physikalische Zielsetzung hin optimiert worden. Hierzu werden zunächst die gasunabhängigen Parameter der individuellen Kammertypen vorgestellt. Um den Einfluß der Gase auf das Meßresultat zu verstehen, werden die physikalischen Prozesse in Proportional- und Driftkammern näher erläutert. Im Hinblick auf den Langzeitbetrieb der Spurkammern werden abschließend zusätzliche Anforderungen an die verwendeten Kammergase behandelt.

3.1 Design der Vieldrahtkammern

Im folgenden werden die wichtigsten Konstruktionsparameter des im H1-Experiment eingebauten Spurkammersystems diskutiert. Hierzu wird der Aufbau der Drift- und Proportionalkammern sowie der Module zur Erzeugung von Übergangsstrahlung vorgestellt.

a) Driftkammern

Wichtigste Meßaufgabe einer Driftkammer ist die präzise Ortsbestimmung, die auf eine Zeitmessung zurückgeführt wird. Der Zeitpunkt des Primärteilchendurchtritts t_0 wird mit anderen Detektoren wie MWPCs und Szintillatoren bestimmt. Die Ankunftszeit t_A der erzeugten freien Elektronen an der Anode wird mit Hilfe einer geeigneten Elektronik registriert [KOL92, ZIM89]. Im einfachsten Fall eines konstanten Driffeldes kann aus dieser Zeitdifferenz durch Multiplikation mit der Driftgeschwindigkeit v_d der Durchgangsort x_{Spur} in Richtung der elektrischen Feldlinien ermittelt werden:

$$x_{Spur} = (t_A - t_0) \cdot v_d \quad (3.1)$$

In Abb. 3.1 sind im Querschnitt die Ausschnitte aus den H1-Driftkammern dargestellt, die man als Zelle bezeichnet. Wesentliche Bestandteile sind die Anodendrähte in der Mitte und die Kathoden als äußere Begrenzung. Je nach Geometrie der Kammer sind letztere in Form von leitenden Flächen (Planare, CIZ, COZ), Streifen (Planare, Radiale, CIZ, COZ) oder Drähten (CJC) realisiert, um eine möglichst homogene Feldverteilung zu erreichen. Für CJC, CIZ und COZ sind zusätzlich elektrische Feldlinien eingezeichnet. Die durch Ionisation längs der Spur erzeugten freien negativen Ladungen (e^-) werden entlang dieser Linien zur Anode bewegt. Senkrecht dazu sind Äquidriftzeitlinien eingetragen, die alle Orte gleicher Driftzeit zur Anode miteinander verbinden. Durch den geometrischen Unterschied der Driftlängen erfahren die e^- eine Ankunftszeitverschmierung. Dieser Effekt kann in beschränktem Maße durch Einführen weiterer Potentialdrähte in Anodennähe vermindert

werden. Weitere Vorzüge dieser Maßnahme sind eine saubere Trennung des Einzugsbereichs benachbarter Anodendrähte sowie die Möglichkeit die Spannungen für den Drift- und den Anodenbereich getrennt einzustellen. Im Raumgebiet von etwa 100 μm um die Anoden wird eine kontrollierte Vervielfachung (Gasverstärkung) der bis dahin gedrifteten Elektronen erzeugt. Die dazu notwendige hohe Feldstärke wird durch Anlegen einer Hochspannung an möglichst dünnen Drähten realisiert.

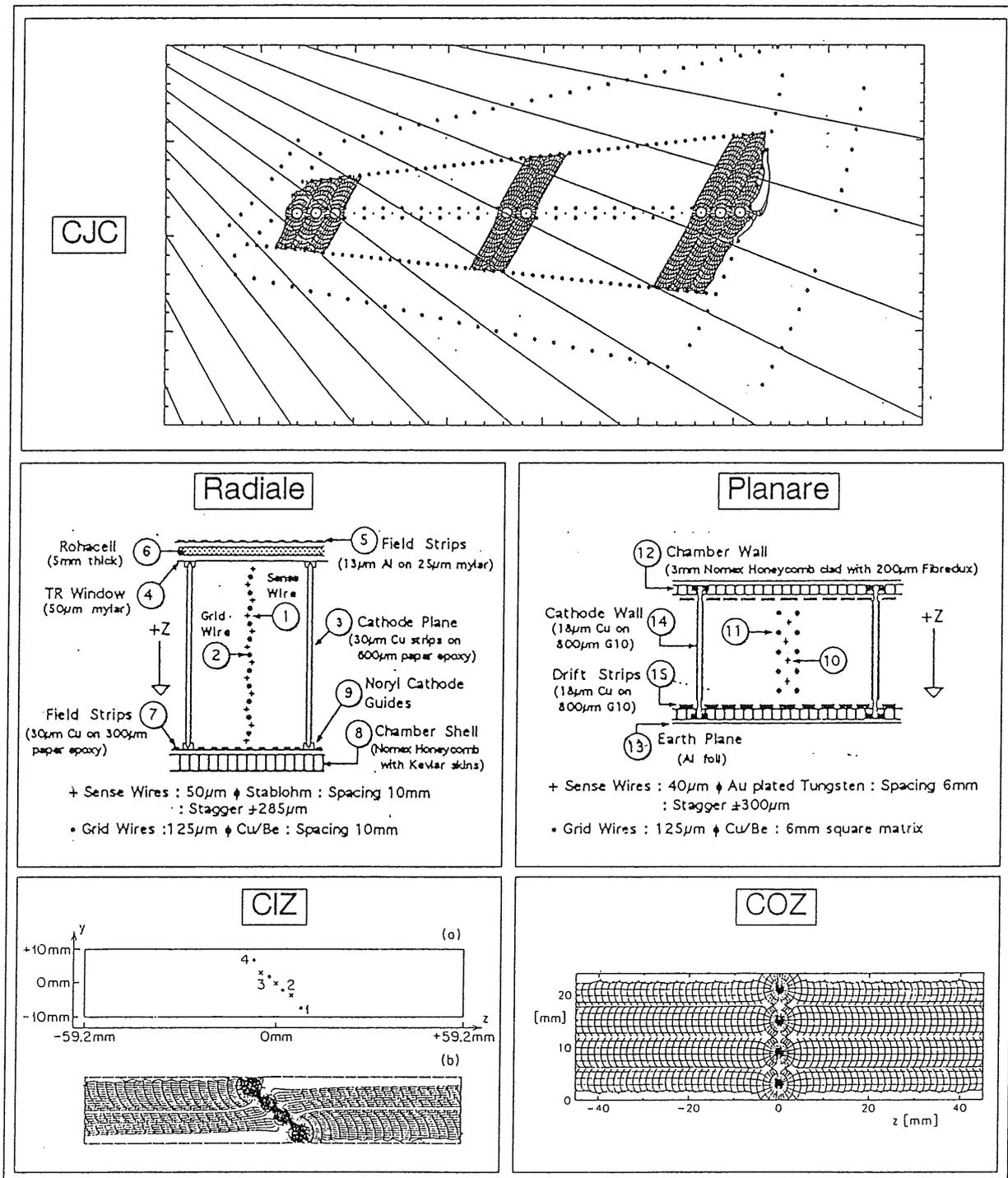


Abb. 3.1: Querschnitte durch die Zellen der H1-Driftkammern aus [H1C03, EGL89]

Der mit der Formel 3.1 bestimmte Ort in der in Abb. 3.1 dargestellten Ebene kann zunächst einen Teilchendurchgang rechts oder links von der Anodenebene bedeuten. Diese Doppeldeutigkeit kann durch mehrere konstruktive Maßnahmen aufgelöst werden. Bei der Rekonstruktion der Spur werden aus den gemessenen Koordinaten aller Signaldrähte zwei mögliche Ebenen berechnet und in Richtung des Wechselwirkungspunktes "WWP" verlängert. Die Ebene mit dem größten Abstand zu diesem Punkt kann ausgeschlossen werden. Bei den zentralen Jetkammern sind die zu einer Zelle gehörenden Drahtgruppen um einen Winkel von 30° in ϕ -Richtung gegenüber den aus dem WWP kommenden geraden Spuren verdreht. Die richtigen Spuren durchkreuzen immer eine Drahtebene, so daß die Spiegelspuren eindeutig ausgeschlossen werden können. Bei der COZ treten, außer an der Stelle direkt über dem WWP bei $z = 0$, die Teilchen immer unter einem Winkel zur Anodenebene ein. Die verlängerten Spiegelspuren weichen somit in Richtung $+z$ bzw. $-z$ stärker vom WWP ab.

Eine weitere konstruktive Maßnahme ist ein kleiner, um die Zellenmittelebene alternierender Versatz aufeinanderfolgender Anodendrähte (vergl. Tab. 3.1, Abb. 3.1). Die gemessenen Zeiten sind bei den in Spurrichtung versetzten Drähten kürzer als bei den übrigen. Bei der Spurrekonstruktion ergibt sich daher nur eine Möglichkeit die gemessenen Punkte zu einer Spur zu verbinden. Dieses Prinzip wird bei den CJs, den Radialen und den Planaren angewendet.

In der CIZ sind die Anodenebenen in Richtung des WWP geneigt, um einen möglichst kleinen Winkel zwischen Spuren aus dem WWP und den Äquidriftzeitlinien zu erreichen. Die beiden äußeren Potentialdrähte einer Zelle sind um ca. 1,1 mm gegen die Anodenebene versetzt. Die Rechts/Links-Zweideutigkeit wird gelöst, weil je nach getroffener Zellenhälfte entweder die drei inneren oder die drei äußeren Anoden ein Signal liefern (s. CIZ-Driftlinien in Abb. 3.1).

Parameter	Einheit	CJC1	CJC2	Planare	Radiale	CIZ	COZ
aktive Kammerlänge in z	mm	2200		3x32	120	1800	2160
Innenradius	mm	203	530	- 150		173,5	460
Außenradius	mm	451	844	- 750		200	485
Anzahl Zellen / Kammer	--	30	60	3x32	48	15 ¹⁾	24 ¹⁾
Anz. Potentialdr. / Zelle	--	50	66	10	11	3	6
Anz. Anodendr. / Zelle	--	24	32	4	12	4	4
Anodendurchmesser	μm	20		40	50	20	48
Anodenabstand	mm	10,16		6	10	5,6/7,1	6
Anodenversatz	μm	150		300	285	(2,1) ²⁾	--
maximale Driftstrecke	mm	44,5	43,1	28	50	61,25	45
1) eine Zelle entspricht hier einem Ring; 2) hier: Versatz der Potentialdrähte							

Tab. 3.1: Konstruktionsparameter der H1-Driftkammern aus [BÄR89, EGL89, H1C03, H1C04]

Die bisher vorgestellte Rekonstruktion kann nur eine Ebene im Raum beschreiben. Zur vollständigen Ortsbestimmung fehlt noch die Koordinate in Drahtrichtung. Durch Auslesen des Signals an beiden Drahtenden kann die Position entlang des Drahtes auf bestenfalls 1% der Drahtlänge festgelegt werden. Bei fast allen H1-Driftkammern wird von der Methode der Ladungsteilung auf resistiven Anodendrähten Gebrauch gemacht. Hierbei wird ausgenutzt, daß die am spurfernen Ende ausgekoppelte Ladung Q_{fern} kleiner als die am entgegengesetzten Ende gemessene Q_{nah} ist. Bei symmetrischem Aufbau ist das Verhältnis der Differenz der beiden Ladungen zur gesamten gemessenen Ladung dem Abstand zur Spur längs des Drahtes x_{Draht} proportional. Der Faktor "effektive Länge" $x_{eff.}$ wird hauptsächlich durch den Drahtwiderstand im Verhältnis zum Eingangswiderstand der Vorverstärker bestimmt.

$$x_{Draht} = x_{eff.} \cdot (Q_{fern} - Q_{nah}) / (Q_{fern} + Q_{nah})$$

Die einzige Ausnahme bilden hier die Planaren, da durch die komplette Information der drei um jeweils 60° in ϕ -Richtung gedrehten Kammern eines Moduls alle Raumkoordinaten schon eindeutig festgelegt sind.

Verglichen mit der Ortsauflösung in Driftrichtung ist die so erhaltene Auflösung in Drahtrichtung jedoch relativ schlecht (vergl. Tab. 2.2). Durch die Verbindung von Spursegmenten, die in unterschiedlichen Kammern gemessen werden, kann eine bessere Präzision der Spurposition erreicht werden. So ist die Hauptaufgabe der Z-Kammern, die Auflösung der in den CJs bestimmten Spurabschnitte in z-Richtung zu verbessern. Im Vorwärtsdetektor wird die Güte der Spurpräzision sowohl durch mehrfache Bestimmung in den unterschiedlichen Supermodulen als auch durch Verbinden der präzisen ϕ -Messung der Radialen und der genauen x-y-Bestimmung der Planaren erhöht.

b) Proportionalkammern

Die wichtigste Größe bei den im H1-Experiment eingesetzten Vieldraht-Proportionalkammern (MWPCs) ist eine gute Zeitauflösung. Diese muß deutlich besser als die Zeitdifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wechselwirkungen (96 ns) sein. Aus den Zeitinformationen der MWPCs wird der Zeitnullpunkt t_0 für die Driftkammern bestimmt. Da zusätzlich die Ortsinformation als topologischer Trigger verwendet wird, müssen die Meßwerte auch hinreichend schnell zur Verfügung stehen.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, sind die Abstände der Elektroden in diesen Kammern sehr gering (Tab. 3.2). Der Abstand der Anodendrähte untereinander und zu den Kathoden ist so klein optimiert, daß einerseits gerade keine elektrostatische Abstoßung der Drähte erfolgt und andererseits ein genügend hohes elektrisches Feld zur Gasverstärkung möglich ist. Einfach ausgedrückt sind Proportionalkammern Driftkammern ohne ausgeprägten Driftraum.

Zur Ortsbestimmung ist jeweils an einer der beiden Kathoden einer Kammer zusätzlich ein reguläres Muster aus kleinen, leitenden Flächen ("Pads") angebracht (Ausnahme: rückwärtige MWPC "B-MWPC"). Durch Induktion des Spannungspulses vom Anodendraht wird in den Pads ein Signal erzeugt und ausgelesen. Die Feinheit der Segmentierung bestimmt die Ortsauflösung. Die Orientierung und die Form der Pads ist in den individuellen Kammern der Lage im Detektor angepaßt (Abb. 2.4, Abb. 3.2 und Tab. 3.2).

Die drei MWPCs des Vorwärtssystems "F-MWPCs" bestehen aus jeweils zwei Kammern, wobei die Trennwand dazwischen auf beiden Seiten als Kathodenfläche benutzt wird. Die äußeren Kathoden tragen die Auslese-Pads, wobei eine feine Segmentierung in Kreisen um die Strahlachse und eine grobe Unterteilung von $22,5^\circ$ in ϕ -Richtung besteht. Wegen der höheren Teilchenrate in Strahlrohrnähe nimmt der radiale Abstand der Segmente von außen nach innen ab. Die zylinderförmige CIP ist ebenfalls aus zwei Kammern aufgebaut. Die Padsegmentierung in ϕ beträgt 45° und in z -Richtung sind 60 äquidistante Streifen untergebracht. Die COP ist im wesentlichen baugleich mit der CIP aber die Seg-

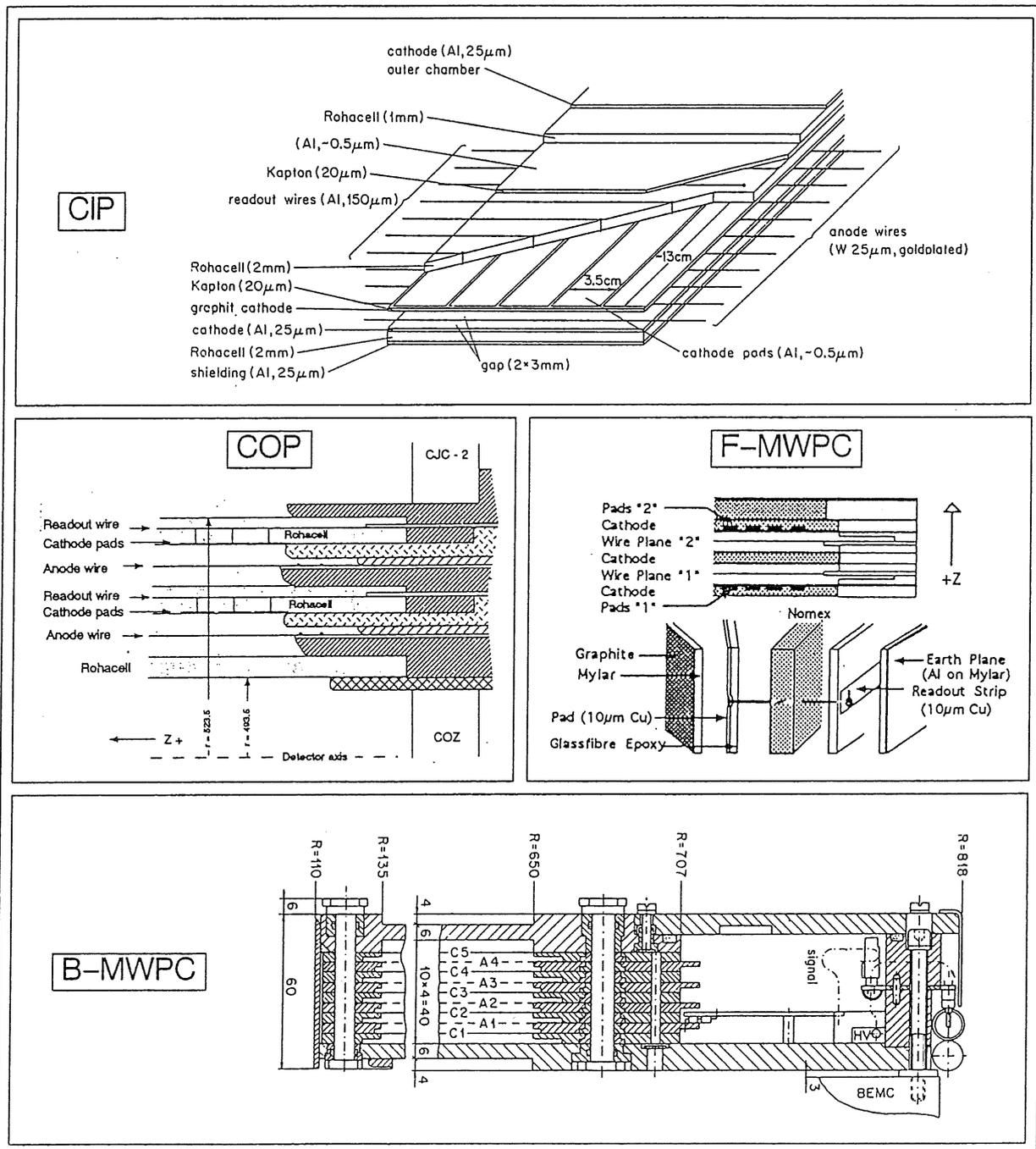


Abb. 3.2: Längsschnitte durch die H1-MWPCs aus [H1C03, MÜ192]

mentierung ist hier $22,5^\circ$ in ϕ und 18 Streifen in z -Richtung. Die "B-MWPC" im rückwärtigen Bereich hat keine segmentierten Kathoden. Bei dieser Kammer werden die Anoden der vier Ebenen ausgelesen. Die wichtigsten Konstruktionsparameter der H1-Proportionalkammern sind in Tab. 3.2 dargestellt.

Parameter	Einheit	CIP	COP	F-MWPC	B-MWPC
aktive Kammerlänge (<i>Richtung</i>)	mm	2190 (z)	2172 (z)	583 (r)	515 (r)
Anzahl Anodenebenen	--	2	2	2	4 ¹⁾
Anzahl Anodendrahte	--	2x480	1574/1615	2x724	4x624
Anodendrahtdurchmesser	μm	25	20	25	30
Anodenabstand	mm	2,1/2,2	2,0	2,5	2,5
Abstand Anode/Kathode (<i>Gas</i>)	mm	3,0	4,0	4,0	4,0
Anzahl von Kathodenpads	--	480	288	384	--
Länge der Pads (<i>Richtung</i>)	mm	36,6 (z)	120 (z)	13-54 (r)	--
Breite der Pads in ϕ -Richtung	$^\circ$	45	22,5	45/22,5 ²⁾	--
1) die Ebenen sind jeweils um 45° gedreht; 2) feinere Einteilung außen s. Abb. 2.4					

Tab. 3.2: Konstruktionsparameter der inneren H1-MWPCs aus [H1C03]

c) Radiatoren

Durchfliegen hochenergetische, geladene Teilchen Materialien mit unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten ϵ_r , so wird mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa $\alpha = 1/137$ Übergangsstrahlung "TR" im Röntgenbereich erzeugt¹. Die Emissionsrichtung liegt um einen sehr kleinen Winkel δ in Teilchenflugrichtung:

$$\delta_{\text{Emiss.}} \propto 1/\gamma \quad \text{mit } \gamma = E/mc^2$$

In Experimenten der Hochenergiephysik wird ausgenutzt, daß die Übergangsstrahlung vom Verhältnis γ der relativistischen Energie zur Masse des Teilchens abhängig ist.

Die Materialdicken und die Anzahl der Übergänge wurden für die H1-Radiatoren so ausgewählt, daß nur Elektronen mit einer Energie oberhalb von etwa 2 GeV (entspricht ca. $\gamma = 4000$) Übergangsstrahlung erzeugen (vergl. [PIL93]). Jeder der drei Radiatoren besteht aus 400 Folien (Polypropylen), die $19 \mu\text{m}$ dick sind. Diese Folien werden durch im Tiefziehverfahren hergestellte quadratische Einprägungen (vergl. [BAR90]) auf einem mittleren Abstand von etwa $230 \mu\text{m}$ gehalten. Die etwa 10 cm dicke Struktur ist durch Verschweißen und Glasfaserverstärkung an den Rändern selbsttragend. Die Folien sind senkrecht zur Strahlachse orientiert und das Volumen wird mit einem Gas gespült, welches nur wenig Absorptionsvermögen für weiche Röntgenphotonen besitzt.

1. erste Vorhersage [GAR59], aktuellere Übersicht [STR86]

3.2 Funktionsweise und Gaseinfluß

Mit dem Bau der Kammern sind zu deren Funktion wichtige Parameter wie Entfernung, Anordnung und Art der Elektroden festgelegt. Zur optimalen Arbeitsweise ist nun die Wahl des Kammergases entscheidend. Um dessen Einfluß zu verstehen, werden die physikalischen Vorgänge in Drift- und Proportionalkammern zum Nachweis von geladenen Teilchen und Übergangsstrahlungsphotonen kurz erläutert.

a) Spurentstehung

Der erste zu erörternde elektromagnetische Prozeß findet zwischen dem durch das Gasvolumen der Kammern fliegenden geladenen Teilchen aus dem WWP und den Atomen und Molekülen des Kammergases statt. Zum Nachweis in den Kammern werden nur die durch Ionisation entstandenen Elektronen benutzt. Photonen konvertieren meist an den Kammerwänden, Kabeln, Vorverstärkern und Elektroden, da deren Material etwa 1000 mal dichter als das Kammergas ist. In den Kammern werden die Ionisationsspuren der e^+e^- -Paare nachgewiesen. Die Photonen der Übergangsstrahlung haben Energien im Bereich von etwa 3–20 keV und treten zusammen mit dem verursachenden Teilchen (bei H1: Elektronen) in das Gasvolumen ein. Das durch Photoeffekt aus dem Gas freigesetzte e^- ionisiert das Kammergas zusätzlich zur Spur des Primärteilchens.

Der mittlere Energieverlust geladener Teilchen pro Wegstrecke $\langle -dE/dx \rangle$ läßt sich näherungsweise durch die Bethe-Bloch Formel beschreiben (siehe z.B.: [PDG92]). Interessant für eine Teilchenidentifikation ist dabei, daß der Energieverlust von der Geschwindigkeit des Teilchens $\beta = v/c$ abhängt. Bei kleinen Geschwindigkeiten fällt der Energieverlust proportional zu $1/\beta^2$ ab und durchläuft bei einem $\beta\gamma = p/mc$ von ungefähr 4 ein Minimum ("minimal ionisierendes Teilchen"). Es folgt ein logarithmischer Anstieg, der bei geringer Gasdichte bis zu 50% über den minimalen Energieverlust reicht und bei noch höherem $\beta\gamma$ in Sättigung geht [KLE87]. Bis zum Sättigungswert können durch Messung des Energieverlustes geladene Teilchen mit verschiedener Masse aber demselben Impuls unterschieden werden, da deren Geschwindigkeit differiert.

Die Energieabgabe in gasförmigen Medien ist ein statistischer Prozeß, weil es sich um diskrete Kollisionen mit den Hüllenelektronen handelt. Da die Anzahl der diskreten Energieüberträge gering ist, gilt hier die Poisson-Statistik. Entscheidend für den Nachweis in den Kammern ist in erster Linie die Anzahl der durch Ionisation entstehenden Elektronen pro Wegstrecke. Die Tatsache, daß einerseits die Zahl der Kollisionen, die zur Ionisation des Kammergases führt, fluktuiert und andererseits der Energieübertrag über einen weiten Bereich schwanken kann, führt zu einer charakteristischen Form der gemessenen Energieverlustverteilung. Diese asymmetrische, einer Landaufunktion ähnliche Verteilung hat ihr Maximum ($dE/dx_{most\ prob.}$) bei kleinen Energieüberträgen, da der klassische Wirkungsquerschnitt hierfür hoch ist. Weil hohe Energieüberträge möglich, aber weniger wahrscheinlich sind, weist die Verteilung einen langen Ausläufer zu hohen Energien auf. Bei den seltenen hochenergetischen Kollisionen sind die herausgeschlagenen Elektronen so energiereich (Delta-Elektronen), daß diese auf einer Strecke von bis zu einigen 10 μm das Gasvolumen ionisieren. Bei den häufigsten Ionisationen erzeugen die primär entstandenen Elektronen in einem Raumgebiet von bis zu 100 μm im Mittel etwa 2–7 weitere Elektron-Ionen-Paare (vergl. Tab. 3.3 und [KLE87]).

	Helium	Argon	Xenon	Methan	Ethan
Anzahl total erzeugter e^- : n_{tot} [1/cm]	7,8	94	307	53	102
Energieverlust: $dE/dx_{min.}$ [keV/cm]	0,32	2,44	6,76	1,48	2,71

Tab. 3.3: minimaler Energieverlust und Anzahl der von einem minimal ionisierenden Teilchen produzierten Elektron-Ionen-Paare in H1-Kammern aus [SAU77, CHR71]

Eine gute Elektronenausbeute erhält man durch Verwendung von Edelgasen unter hohem Druck (z.B.: im flüssigen Argon des H1-Kalorimeters). Im Gegensatz zu Molekülgasen, die Energie in Rotations-, Vibrations- und Schwingungszuständen aufnehmen können, sind hier nur Anregung und Ionisation der Atomelektronen möglich. Hohe Drücke sind wegen der Leichtbauweise beim H1-Detektor nicht realisierbar, jedoch enthalten fast alle H1-Kammern (Ausnahme: die Radialen) das Edelgas Argon als Hauptbestandteil. Soll nun der Energieverlust zwecks Teilchenidentifikation gemessen werden (CJC, Radiale), so kann ein brauchbares Ergebnis nur durch Vielfachmessung ("Sampling") der Ionisationsspur erhalten werden. Die Präzision der Messung des Energieverlustes mit einer Driftkammer hängt neben der Gasart vom Gasdruck P , dem Signaldrahtabstand s und der Anzahl N der Meßpunkte ab. Für diesen funktionellen Zusammenhang in Argon geben [ALC80] an²:

$$\frac{FWHM(dE/dx_{most\ prob.})}{dE/dx_{most\ prob.}} = 0,96 \cdot N^{-0,46} (s \cdot P)^{-0,32} \quad \text{mit: } \begin{array}{l} P \text{ in } 10^5 \text{ Pa} \\ s \text{ in } 10^{-2} \text{ m} \end{array}$$

Als praktisches Beispiel für eine Teilchenidentifikation sind in Abb. 3.3 die Ergebnisse der CJC aufgetragen.

Die Photonen der Übergangsstrahlung sollen im Gasvolumen sicher nachgewiesen werden. Deshalb werden in den Radialen Driftkammern Gase eingesetzt, die im oben erwähnten Energiebereich einen hohen Photoabsorptionsquerschnitt aufweisen. Für weiche Röntgenphotonen ist das schwere Edelgas Xenon optimal. Die Bewegungsenergie des durch den Photoeffekt freigesetzten Elektrons reicht aus, um das Kammergas meßbar zu ionisieren. Da beim Nachweis von Übergangsstrahlung auch immer die Ionisation des Primärteilchens im selben gemessenen Signal enthalten ist, führt auch hier ein Sampling zur besseren Unterscheidung von Spuren mit und ohne Übergangsstrahlung. Aufgrund des ähnlichen Ionisationsverhaltens können jedoch Deltaelektronen Übergangsstrahlung vor-täuschen.

b) Drift

Ohne die Kraft von elektrischen oder magnetischen Feldern würden die erzeugten Elektronen im Kammergas im wesentlichen am Entstehungsort verbleiben. Deren Bewegung ließe sich durch die Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung beschreiben, wobei die Energie durch die Gastemperatur bestimmt wird. Zur Registrierung der Spur wird daher ein elektrisches Feld von typisch 1 bis 2 kV/cm angelegt, um die e^- in Richtung des Ausleседrahtes zu bewegen. Der hierzu vorgesehene Raum ist bei den H1-Driftkammern bis ca.

2. FWHM = engl. Abk. für: volle Breite in halber Höhe des Maximums

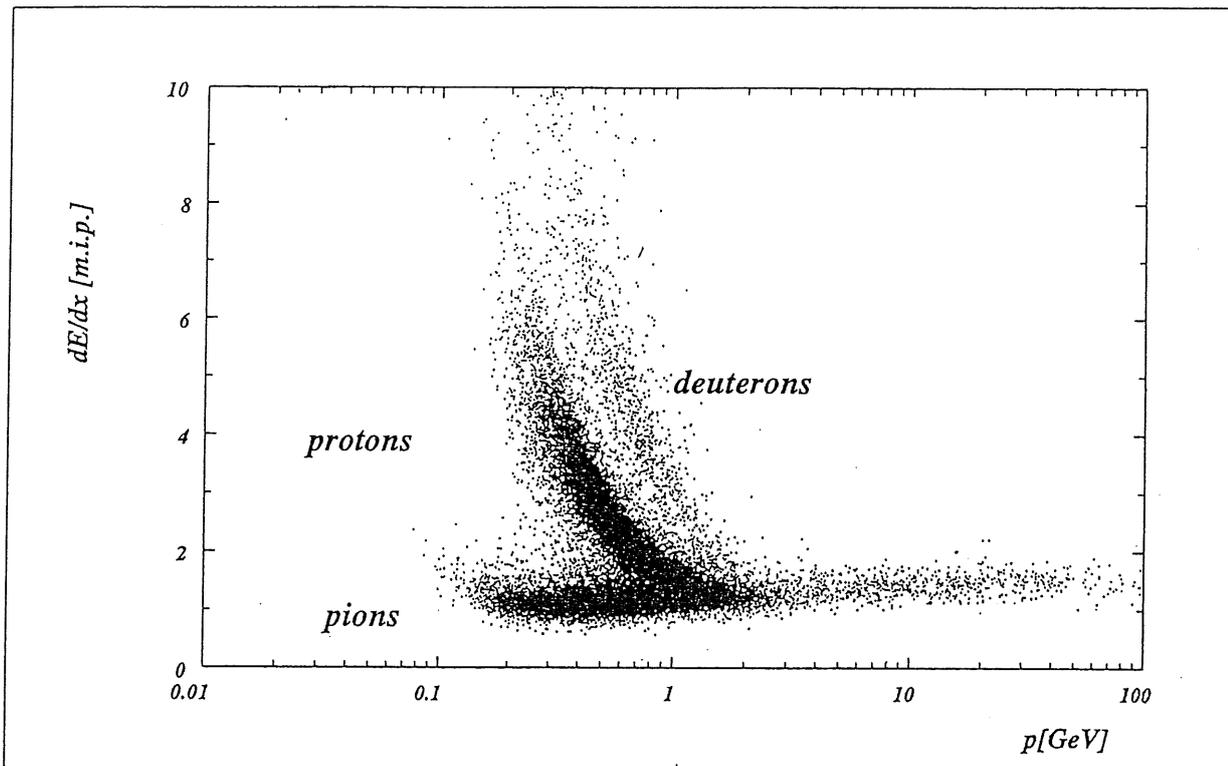


Abb. 3.3: Teilchenidentifikation mittels Impuls- und Energieverlustmessungen der CJC, aus [H1C03]

61 mm lang (vergl. Tab. 3.1) und so konstruiert, daß die elektrische Feldstärke im gesamten Raum möglichst homogen ist. Durch dieses Feld werden die e^- in Richtung Anode beschleunigt, bis durch Stöße mit den Kammergasatomen und Molekülen die Bewegung wieder abgebremst wird. In dieser Richtung ergibt sich eine mittlere Geschwindigkeit der Elektronen, die als Driftgeschwindigkeit v_d bezeichnet wird. Neben dem angelegten Feld sind die mittlere freie Weglänge zwischen den Stößen und die mittlere Energieabgabe pro Stoß die entscheidenden gasabhängigen Parameter. Bei der Drift verbreitert sich die Elektronenwolke durch Diffusion longitudinal und transversal zur Bewegungsrichtung in unterschiedlichem Maß. Die räumliche Ausdehnung bzw. die Ankunftszeitverteilung σ_D nimmt mit der Länge der Driftstrecke x_d zu und mit der Anzahl N der e^- ab:

$$\sigma_D = \sqrt{2D_l/v_d} \cdot \sqrt{x_d/N} \quad \text{mit } D_l = \text{longitudinale Diffusionskonstante}$$

Für die H1-Driftkammern muß die Driftgeschwindigkeit im Bereich von 40 bis 55 $\mu\text{m/ns}$ liegen. Mit diesen Werten ist nach der Spurrekonstruktion noch eine eindeutige Zuordnung der Ereignisse zum richtigen Kollisionszeitpunkt möglich. Die Driftgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke \bar{E} ist für eine Vielzahl von Gasgemischen gemessen worden. Die wichtigsten Ergebnisse stehen in Form von Zusammenstellungen (z.B. [PEI84]) oder Simulationsprogrammen (z.B. Wircha [FPV83]) zur Verfügung. Als Beispiel ist in Abb. 3.4 die Abhängigkeit der Driftgeschwindigkeit und der Diffusion von der elektrischen Feldstärke für die im H1-Experiment häufig verwendete Gas Mischung Argon/Ethan 50/50 dargestellt.

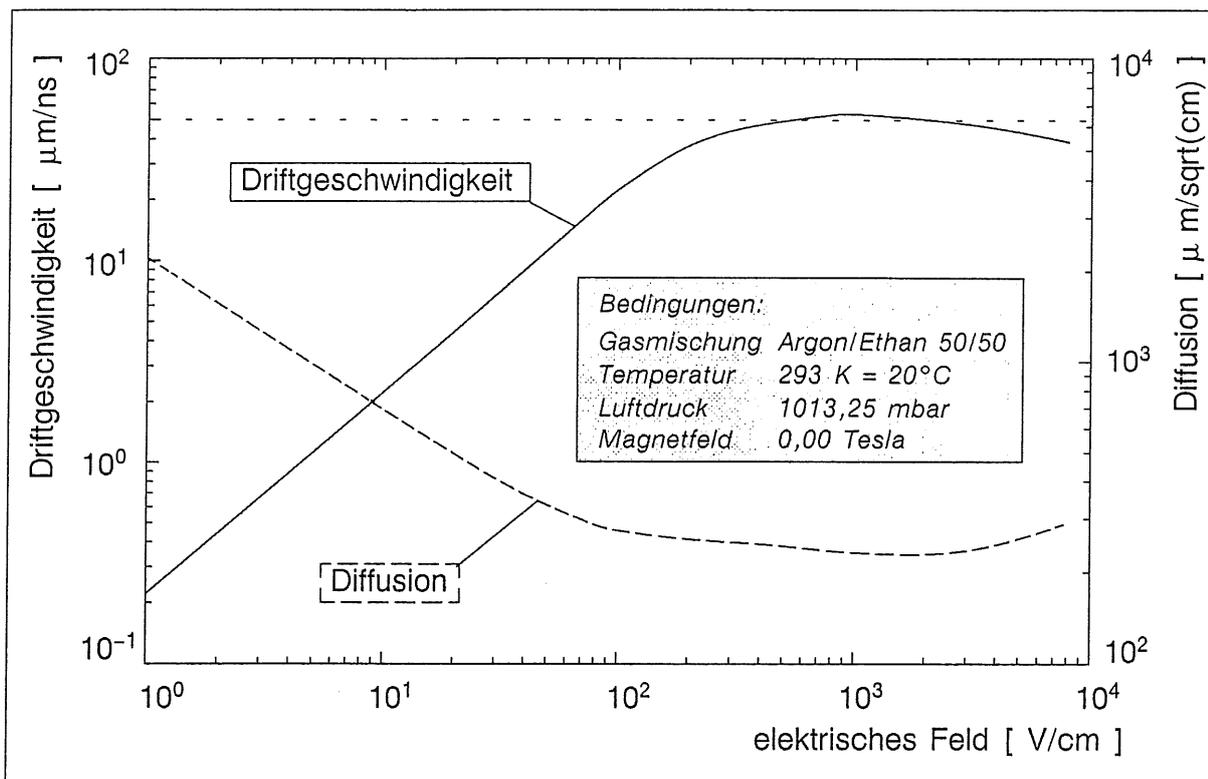


Abb. 3.4: Abhängigkeit der Elektronen-Driftgeschwindigkeit und der Diffusion vom elektrischen Feld; Programm Wircha [FPV83]

Für die praktische Anwendung ist es hilfreich, die Feldstärke so zu wählen, daß man sich in der Sättigung der Driftgeschwindigkeit befindet. Dann haben Schwankungen der angelegten Hochspannung, der Gaszusammensetzung, des Kammerinnendruckes sowie der Temperatur den geringst möglichen Einfluß auf die Driftgeschwindigkeit. Zur Veranschaulichung ist in Abb. 3.5 für einen Konzentrationsbereich von 40–60% Argon in Ethan und einer elektrischen Feldstärke von 1200 V/cm die mit Wircha berechnete Driftgeschwindigkeit unter Normalbedingungen dargestellt. Die vier weiteren Kurven zeigen die Auswirkungen der Variation des Gasdruckes um ± 30 mbar sowie Temperaturschwankungen von $\pm 20^\circ\text{C}$.

Da die Anlagen zur Gasversorgung und besonders die Kammern selbst nie vollkommen gasdicht zu bauen sind, können durch unvermeidliche Lecks und Diffusion Fremdgase ins Kammergas gelangen. Meist sind das die Bestandteile der Umgebungsluft: Stickstoff, Sauerstoff und Wasserdampf. Der wichtigste Einfluß von Stickstoff ist eine Veränderung der Driftgeschwindigkeit, die bis zu $\Delta v_d = 1\%$ pro Volumenprozent des Stickstoffes betragen kann [HON88]. Der elektronegative Sauerstoff und andere elektroaffine Verunreinigungen können schon in geringsten Konzentrationen zur Reduzierung der Driftelektronen ("Attachment") führen [SAU77]. Durch den Elektroneneinfang wird die Anzahl der zum Signal beitragenden Ladungen erniedrigt. Wasserdampf im Kammergas zeigt bei Abwesenheit von Sauerstoff kein Elektron-Attachment, allerdings wird das Attachment am Sauerstoff durch die Anwesenheit von Wasser verstärkt [HUK88]. Proportional zu seinem Anteil am Gasgemisch verändert Wasser die Driftgeschwindigkeit. Um die genannten Ef-

fekte zu vermeiden, ist mit Hilfe der Gasversorgungsanlagen die Konzentration der genannten Gase gering zu halten.

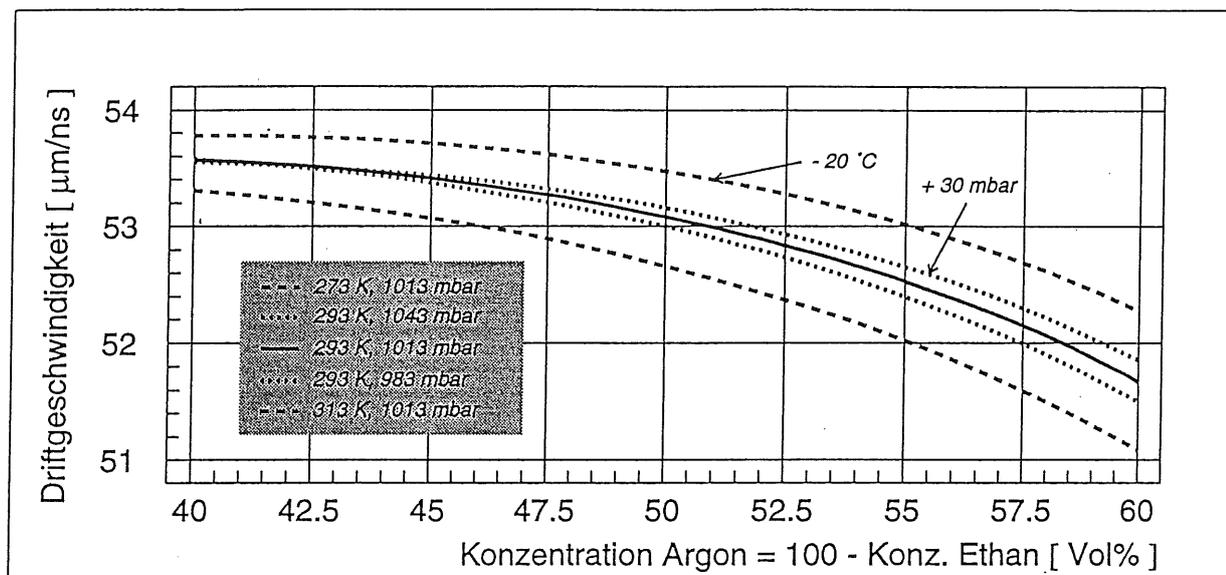


Abb. 3.5: Driftgeschwindigkeit in Argon/Ethan in Abhängigkeit von Zusammensetzung, Druck und elektrischer Feldstärke; Programm Wircha [FPV83]

Im H1-Experiment erfahren die driftenden Elektronen zusätzlich eine weitere ablenkende Kraft durch das senkrecht zum elektrischen Feld \vec{E} orientierte starke Magnetfeld von $\vec{B} = 1,2$ Tesla. Dieses dient primär dazu, die Spuren der Teilchen aus den Wechselwirkungen auf Helixbahnen abzulenken, um aus der Krümmung der Spur den Impuls des Teilchens zu bestimmen. Die Kraftwirkung $\vec{F}_{\text{magn.}} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$ verursacht ebenso eine Richtungsänderung der driftenden Elektronen von der erzeugten Ionisationsspur dieser Teilchen. Zusätzlich zur elektrischen Kraft $\vec{F}_{\text{elektr.}} = q \cdot \vec{E}$ werden die Elektronen zwischen zwei Stößen auf kreisähnliche Bahnen abgelenkt. Als Resultat erhält man eine von \vec{E} und \vec{B} abhängige mittlere Driftgeschwindigkeit, wobei die Driftrichtung um den "Lorentzwinkel" α gegenüber den elektrischen Feldlinien gedreht ist.

Deshalb wurden z.B. die Drifträume der CJs so "schief" konstruiert, daß die zum Einzugsbereich eines Anodendrahtes gehörenden Spursegmente möglichst senkrecht darauf zudriften. Die in Abb. 3.1 dargestellten durchgezogenen Geraden repräsentieren aus dem WWP stammende Teilchen mit unendlichem Impuls, die sehr genau parallel zu den Isochronen orientiert sind. So kann erreicht werden, daß Elektronen von unterschiedlichen Orten der Spur annähernd gleichzeitig die Anode erreichen und die Fluktuationen innerhalb der Spur die Zeitauflösung minimal beeinträchtigen.

Bei den MWPCs ist lediglich die Richtungsänderung der driftenden Elektronen aufgrund des Magnetfeldes zu berücksichtigen, da hier kein ausgeprägter Driftraum vorhanden ist. Es ist dafür zu sorgen, daß möglichst viele Driftlinien aus dem kompletten Gasvolumen der Kammer auf den Anodendrähten enden. Der Einfluß von Gasverunreinigungen spielt hier eine untergeordnete Rolle, da die Driftstrecken nur wenige Millimeter lang sind.

c) Gasverstärkung

Wegen der geringen Anzahl von zur Anode gedrifteten Spurelektronen ist eine direkte Auslese nicht mit einfachen Mitteln möglich (Ionisationskammer). Daher werden die Elektronen im stark ansteigenden elektrischen Feld von einigen 10 kV/cm der typisch 20 bis 50 μm dicken Anodendrahte "gasverstärkt". Die Elektronen erlangen hier zwischen zwei Stößen eine wesentlich höhere Driftgeschwindigkeit und nehmen dabei genügend Energie auf, um weitere Gasatome bzw. -moleküle zu ionisieren. Da auch die neu entstehenden Elektronen zu weiteren Ionisationen führen, kommt es zu einer lawinenartigen Vermehrung der Ladungsträger. Die Elektronen werden innerhalb weniger Nanosekunden auf dem Anodendraht gesammelt und ausgelesen. Aufgrund ihrer größeren Masse bewegen sich die Ionen nur langsam zur Kathode, wo sie neutralisiert werden.

Als Gasmischung werden bei H1 Mischungen von Edelgasen und Kohlenwasserstoffen eingesetzt. Edelgase besitzen eine klar definierte Ionisationsenergie, so daß die Gasverstärkung schon bei geringen Feldstärken einsetzt. In reinen Edelgasfüllungen werden jedoch sowohl durch Photonen, die von angeregten Atomen in der Ladungslawine ausgesendet werden als auch durch Photoeffekt bei der Neutralisation der positiven Ionen an der Kathode weitere Elektronen ausgelöst, die zu unerwünschten Nachentladungen führen [KLE87]. Der Zusatz von Kohlenwasserstoffen verhindert diesen Vorgang, da diese mit einem großen Absorptionsquerschnitt für niederenergetische Strahlung die Photondichte reduzieren. Zusätzlich haben Kohlenwasserstoffe niedrigere Ionisationspotentiale als Edelgase. Daher kann durch Stöße mit Edelgaskationen ein Elektronenaustausch stattfinden. Da die Ionen von Kohlenwasserstoffen an der Kathode dissoziieren und dabei Energie verlieren, steht die für eine Elektronenauslösung aus der Kathode benötigte Energie nicht mehr zur Verfügung.

Sowohl Drift- wie Proportionalkammern arbeiten im Bereich der Proportionalverstärkung, d.h. das ausgekoppelte Signal entspricht bis auf einen möglichst konstanten Faktor der Anzahl primär erzeugter Elektronen. Der Gasverstärkungsfaktor beträgt typisch 10^4 bis 10^6 und hängt von Gaseigenschaften, Anodendraht und Feldstärke ab. Die mittlere Anzahl der Elektronen-Ionen-Paare ergibt sich durch Integration über die radiale Ausdehnung der Elektronenwolke am Draht [KOR41]:

$$M = e \int_{r_c}^a \alpha(r) dr$$

Mit a wird der Außendurchmesser des Anodendrahtes bezeichnet und r_c ist der kritische Radius, bei dem die Lawinenbildung einsetzt. α ist der 1. Townsend Koeffizient, der von den Gaseigenschaften und der elektrischen Feldstärke abhängt (versch. Näherungen für α siehe [KOR46, SAU77]).

Der Prozeß der Gasverstärkung spielt bei den Proportionalkammern die entscheidende Rolle. Bei der kleinen Bauform dieser Kammern (siehe Tab. 3.2) haben geringste mechanische Toleranzen im Abstand der Kathoden (typisch 100 μm) schon starke Auswirkungen auf die elektrische Feldstärke. Es wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um Gasmischungen zu finden, bei denen in einem großen Spannungsbereich dieselbe Kammereffizienz möglich ist. Daher findet man bei den Parametern von MWPCs immer die Angabe der "Plateaulänge". Das ist die Spannung, um welche die Anoden-

spannung erhöht werden kann, so daß die Zählrate bei konstantem Teilchenfluß konstant bleibt. Meist wird diesen Kammern bewußt ein elektroaffines Gas wie Freon®-12 zuge-
setzt, um die durch Photoeffekt an der Kathode gebildeten Elektronen zu absorbieren
und um Alterungsprozesse bei hoher Gasverstärkung zu verhindern.

Abschließend sind die bei den H1-MWPCs in 1992 verwendeten Gasmischungen und
die dazugehörigen Hochspannungen in Tab. 3.4 zusammengestellt. Bei den gemessenen
Zeitauflösungen unter Strahlkonditionen wurde die Referenzzeit aus den Szintillatorsi-
gnalen der Flugzeitähler "TOF" gewonnen (Abb. 3.6). Das TOF befindet sich in Elek-
tronenflugrichtung hinter dem warmen elektromagnetischen Kalorimeter im H1-Detektor
(vergl. Abb. 2.3).

Parameter	Einheit	CIP	COP	F-MWPC	B-MWPC
Einsatz des Plateaus	V	2425/2375	2900	1900	2800
Plateaulänge	V	200/250	200	300	200
Gasmischung	Vol%	Argon: 49,9 Ethan: 49,9 Freon-12: 0,2		Argon: 89,4 Propan: 9,9 Ethanol: 0,7	Argon: 49,9 Ethan: 49,9 F-12: 0,2

Tab. 3.4: Gasmischung und Hochspannung der H1-MWPCs in 1992 aus [H1C03]

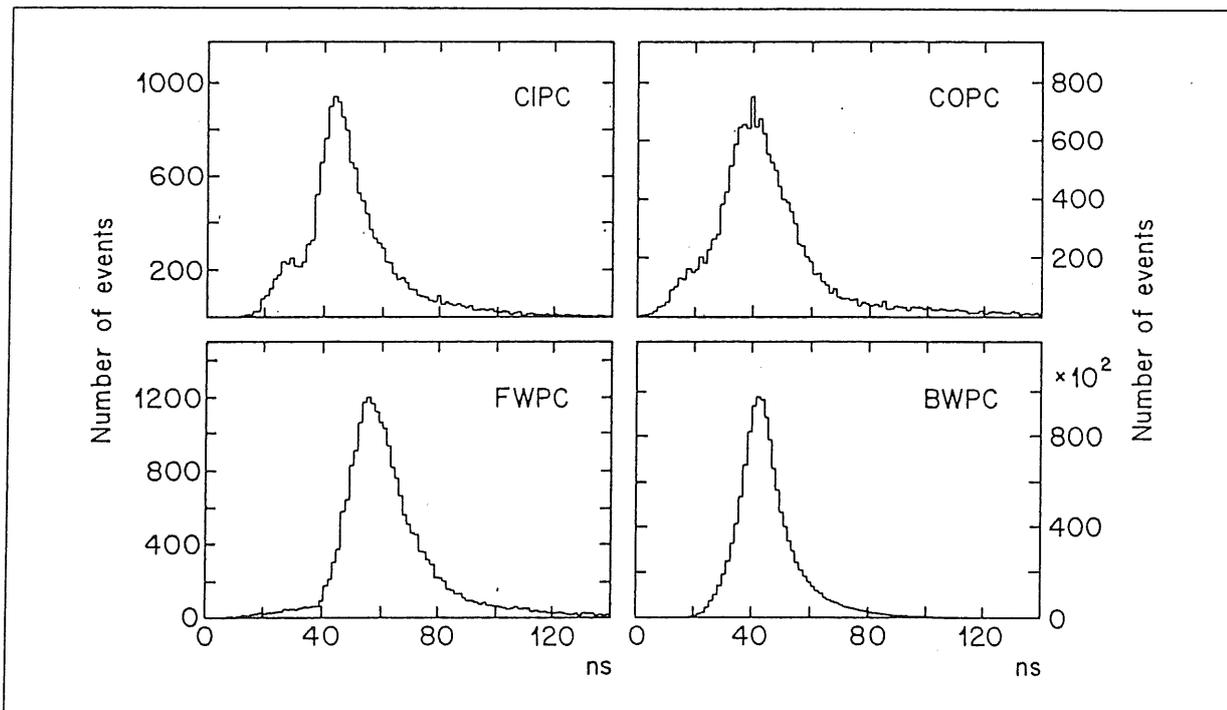


Abb. 3.6: In 1992 gemessene Zeitauflösung der H1-MWPCs aus [H1C03]

Die in 1992 erzielten Ortsauflösungen der Driftkammern sind zusammen mit den Driftfel-
dern und der Gaszusammensetzung in Tab. 3.5 aufgelistet. Der Fehler der Ortsauflösung
setzt sich zusammen aus einem konstanten Fehler der Zeitauflösung der Elektronik, den
statistischen Schwankungen der Primärionisation und der Produktion von Deltaelektronen,

der Abweichung von der mittleren Driftgeschwindigkeit, der ortsabhängigen Diffusion sowie der Verteilung und Anzahl der zum Signal beitragenden Elektronen beim Gasverstärkungsprozeß.

Parameter	Einheit	CJC1+2	Planare	Radiale	CIZ	COZ
Driftfeld \bar{E}	V/cm	1.200	1.000	1.200	527	820
Driftgeschw. ($\bar{B} = 1,14T$)	$\mu\text{m/ns}$	ca. 50	42	37	52	48,5
Ortsauflösung (Sigma)	μm	170	< 170	< 200	260	200
Ortsauflösung in Draht.	mm	22	--	30	28	58
Doppelspurauflösung	mm	--	2	2	4,6	3,5
Gasmischung	Vol %	Ar: 89,5 CO ₂ : 9,5 CH ₄ : 1	Ar: 89 C ₃ H ₈ : 10 C ₂ H ₅ OH:1	Ar: 50 C ₂ H ₆ :50	Ar: 80 CH ₄ :20	Ar: 50 C ₂ H ₆ :50

Tab. 3.5: Driftfeld, Gas und gemessene Ortsauflösung der H1-Driftkammern in 1992 aus [H1C03]

3.3 Langzeitverhalten und Alterung

Bei allen drei betrachteten physikalischen Prozessen, die die Funktion von Drift- und Proportionalkammern beschreiben, sind die Einflüsse des Gases entscheidend. Hieraus lassen sich wichtige Anforderungen an die Anlagen zur Gasversorgung der H1-Spurenkammern ableiten. Die Gaszusammensetzung, der Kammerinnendruck und die Reinheit der verwendeten Gase ist zu garantieren. Da das H1-Experiment voraussichtlich über einen Zeitraum von mehr als 10 Jahren zur Messung an HERA eingesetzt werden wird, sollten diese Anlagen über den genannten Zeitraum ohne größere Störungen im Dauerbetrieb sicher funktionieren.

Gleiches muß natürlich auch für die Kammern gelten. Mit immer höher werdender Luminosität wird auch die von den Kammern zu verkraftende Teilchenrate und Photonenbelastung ständig steigen und die Betriebsbedingungen verändern. Die wachsende Belastung der Kammern kann dazu führen, daß die Ströme in den Drähten zu hoch werden. Im Extremfall bilden sich Dauerentladungen im Gasvolumen aus. Durch eine Reduktion der angelegten Hochspannungen oder den Einsatz einer anderen Gasmischung, in der weniger Ladungsträger erzeugt werden, kann die Funktion der Kammern wiederhergestellt werden. Der Nachteil dieser Maßnahmen ist, daß die Effizienz der Kammern dadurch erniedrigt wird.

a) Ursachen für Alterungseffekte

Weiterhin sind chemische und physikalische Vorgänge innerhalb des Gasvolumens zu vermeiden, die zu Ablagerungen auf den Elektroden führen und als "Alterung" bezeichnet werden (Überblick in [LBL86]). Die nachfolgend beschriebenen Vorgänge können nach dem Bau der Kammern ausschließlich durch eine Änderung von Gasparametern beeinflusst werden.

Die Dissoziationsenergie $E_{Diss.}$ von Kohlenwasserstoffen ist 2 bis 3 mal geringer als ihre Ionisationsenergie I_0 (z.B.: Ethan (C_2H_6): $E_{Diss.} = 3,8$ eV und $I_0 = 11,5$ eV, aus [VAV90]). Deshalb führen inelastische Stöße mit Elektronen oder die Absorption von Photonen häufig zum Aufbruch der Molekülverbindungen [HES86]. Die dabei entstehenden Radikale weisen wegen der Ladungsverzerrung ein hohes Dipolmoment auf. Durch die hohe Feldstärke in unmittelbarer Nähe der Anode werden die Radikale zur Drahtoberfläche hin angezogen. Die dort resultierende hohe Konzentration führt zu Polymerisationserscheinungen. So entstehende lange Kettenmoleküle lagern sich sehr leicht auf der Drahtoberfläche an, wobei mit der Energie aus nachfolgender Gasverstärkung eine chemische Verbindung mit den Drähten [ATA87] sowie mit weiteren Radikalen erfolgen kann. Diese Ablagerungen bilden meist eine isolierende Schicht, die das Feld um den Anodendraht an diesen Orten reduziert. Als Folge nimmt die Gasverstärkung lokal ab und die registrierten Pulse sind nicht mehr der Primärionisation proportional. Die Koexistenz von "normalen" und reduzierten Pulsen macht eine Messung des Energieverlustes unmöglich und die Anzahl von registrierten Spuren wird vermindert (Ineffizienz).

Ablagerungen auf den Kathoden entstehen sowohl durch Polymere, die aus positiven Radikalen der Gasverstärkungsprozesse stammen als auch durch Polymerisationsprozesse, die beim Ladungsausgleich der positiven Ionen erfolgen [DAN88]. Da Kathoden meist großflächiger als die Anodendrahte sind, werden dünnere Beschichtungen gebildet. Diese isolierenden Schichten bewirken, daß Ionen aus der Ladungslawine länger zur Neutralisation brauchen. Übersteigt die Produktionsrate von Ionen die Neutralisationsrate, so können durch das Dipolfeld zwischen angelagerten positiven Ladungen und der Kathode Sekundäremissionen stattfinden (Malter-Effekt [MAL36]). Da die gebildeten Elektronen auf dem Weg zur Anode ihrerseits Ionisationen erzeugen, ist dieser Prozeß selbsterhaltend und führt zu einem Anwachsen von Blindströmen. Im Laufe der Zeit wachsen die Ablagerungen und die gesamte Kammer wird völlig unbrauchbar.

Zusätzlich werden Alterungsvorgänge durch Verunreinigungen in den Kammergasen verursacht. Die wichtigsten davon sind Kohlenwasserstoffverbindungen, Fette, Öle und Silizium [VAV86].

Eine große Anzahl unterschiedlichster Kohlenwasserstoffe wurde beim Kammerbau eingesetzt oder ist in den dazu verwendeten Materialien enthalten (Kleber, Farben, Kunststoffe, ...). Gelangen diese Stoffe mit niedriger Bindungsenergie ins Kammergas, so wird die Konzentration von Radikalen erhöht und die Polymerisationsrate vergrößert. Silizium ist eines der weitverbreitetsten Elemente auf der Erde und kann aus vielen Quellen ins Kammergas gelangen, wo es eine erhöhte Ablagerungsrate bewirkt. Silizium besitzt die gleiche Valenzstruktur wie Kohlenstoff, ist aber wesentlich schwerer. Daher werden schon relativ kurze Polymere mit Silizium an den Oberflächen angelagert. Öle und Fette stammen meist aus Ventilen und anderen mechanisch beweglichen gasführenden Teilen oder können in fein verteilter Form aus Gasvorratsbehältern in die Kammern gelangen. Wegen des hohen Dipolmomentes können diese Komponenten leicht an den Elektroden angelagert werden.

b) Gegenmaßnahmen

Schon beim Bau der Kammern und der Gasversorgungsanlagen wurde darauf geachtet, daß die erwähnten Stoffe möglichst nicht verwendet wurden. Zur Vermeidung von Alterungseffekten sollten diverse weitere Maßnahmen in den Gasversorgungsanlagen angewendet werden.

Hierzu zählt an erster Stelle die Gasreinheit [VAV86, DAN88]. Vor dem Anschluß einer Gasflasche an die Anlage sollte deren Inhalt analysiert werden. Im System sollte durch eine geeignete Filterung und Reinigung die Gasqualität weiter verbessert werden können. Zum Schutz vor aus der Umgebung eindringenden Verunreinigungen sollte die Anlage möglichst gasdicht aufgebaut sein und Möglichkeiten zur Überprüfung der Dichtigkeit aufweisen. Hohe Gasflußraten sollten einen Abtransport von Radikalen aus den Kammern gewährleisten, um hohe Konzentrationen und eine Polymerisation zu verhindern. Weiterhin sollte eine Zumischung von nicht-polymerisierenden Additiven vorgesehen werden. Diese Gase (z.B. Alkohol- und Wasserdampf, Methylal,...) besitzen eine Sauerstoffverbindung der Form $-OH$, $-OCO-$, $-O-$ oder $-CO-$, welche bei der Dissoziation wegen ihrer Elektronegativität eine schnelle Rekombination oder die Bildung von leicht flüchtigen Endprodukten ermöglicht. Die Verringerung der Konzentration von Radikalen wird durch das hohe Dipolmoment der erwähnten Additive noch verstärkt, da sie sich bevorzugt in der Nähe von Elektrodenoberflächen aufhalten. Mit einer hohen Photoabsorption und einem niedrigen Ionisationspotential (Ausnahme: Wasserdampf) weisen die Additive ähnliche Eigenschaften wie die Kohlenwasserstoffe auf. Mit Wasserdampf kann zusätzlich eine schon gebildete Ablagerung wieder teilweise leitfähig gemacht werden.

So wird dem Kammergas der Planaren und der F-MWPCs etwa 1 Vol% Ethanoldampf als Schutz vor Alterungserscheinungen zugesetzt [JUK87, ATA87]. Wegen der schädlichen Wechselwirkung von Ethanol mit dem speziellen Drahtmaterial ("Stablohm 800") der Radialen Kammer, muß dort 2-Propanoldampf (Iso-Propanol) zur Anwendung kommen [ATA87]. Die Zumischung von Alkohol- und / oder Wasserdampf wurde mit zunehmender Luminosität von HERA von immer mehr Kammerbetreibern gewünscht.

4. Anlagen zur Gasversorgung

Basierend auf Vorüberlegungen zum Entwurf der Gasversorgung [GRS87] werden die wichtigsten Anforderungen konkretisiert und das Grundkonzept der Anlagen entwickelt. Nachdem die Anordnung der diversen Anlagenteile im H1-Gebäude gezeigt worden ist, wird der mechanische Aufbau der Hauptsysteme vorgestellt. Abschließend werden Aufbau, Funktion und Bedienung der Steuerelektronik beschrieben.

4.1 Anforderungen an die Gasversorgung

Im vorangegangenen Kapitel wurde erläutert, daß für eine optimale Arbeitsweise der unterschiedlichen Typen von Spurenkammern die Zuordnung einer eigenen Gasversorgung notwendig ist. Diese wird im folgenden als Kreislauf bezeichnet. Die wichtigsten Anforderungen an die individuellen Kreisläufe sind in Tab. 4.1 zusammengestellt.

Die dort angegebenen Gasmischungen sind nur als Beispiel zu betrachten, da diese im Verlauf von Testmessungen ständig variiert wurden. Tabelliert sind die zur Zeit aktuellen Gasmischungen für den Betrieb der Kammern im H1-Experiment. Mit der Mischung 1 wurde die Funktionsweise der "Radialen" Kammern bis Ende 1993 getestet, danach soll bei stabilen Strahlverhältnissen Mischung 2 zur zusätzlichen Messung der Übergangsstrahlung verwendet werden. Um in der Anfangsphase des Beschleunigers eventuell auftretende Strahlungsschäden an den zentralen Jetkammern (CJC1+2) zu vermeiden, wurde zunächst ein Gas mit geringerem Kohlenwasserstoffanteil eingesetzt.

Die Versorgungsanlage war so zu planen, daß unterschiedliche Gasmischungen hergestellt und das Konzentrationsverhältnis den jeweils aktuellen Anforderungen angepaßt werden kann. Um Alterungserscheinungen der Kammern zu vermeiden, waren in einigen Kreisläufen zusätzlich Anlagen zur Addition eines definierten Alkohol- oder Wasserdampfanteils vorzusehen.

Wichtigste Aufgabe eines Kreislaufes ist die sorgfältige Regelung und permanente Überwachung des Gasdruckes in den Kammern. Unter Berücksichtigung der mechanischen Kopplung der Einzelvolumina mußte die Druckregelung so konzipiert werden, daß einzelne Kammern mit unterschiedlich dichter Gaszusammensetzung unabhängig voneinander geregelt werden können. In der Tabelle ist der zur Zeit der Planung gültige Nominaldruck mit dazugehöriger Regeltoleranz angegeben. Ein Überschreiten des Maximaldrucks würde die mechanische Zerstörung der Kammer zur Folge haben.

Weitere Aufgabe eines Kreislaufes ist die Aufrechterhaltung und die Kontrolle des Gasflusses im Ein- und Auslaß der Kammer. Erfahrungsgemäß sollte der Fluß so hoch sein, daß etwa ein- bis zweimal pro Tag das Kammervolumen ausgetauscht wird. Zur Berech-

nung des Maximalflusses wurde sicherheitshalber von einem viermaligen Volumenaustausch pro Tag ausgegangen.

Zur Bereitstellung und Überwachung der Gasqualität waren unterschiedliche Anforderungen zu erfüllen. Zur Spülung der Radiatoren reicht ein beliebiges Gas aus, das keine weiche Röntgenstrahlung absorbiert, wobei die Gasreinheit keine Rolle spielt. Für die kleinvolumigen Kammern ist der geringe Gasmengenbedarf einfach aus Behältern mit vorgemischtem Gas zu decken. Hier waren keine zusätzlichen Möglichkeiten zur Gasreinigung in den Versorgungsanlagen einzuplanen. Aus ökonomischen Gründen mußten zur Versorgung der großen Kammern geschlossene Kreisläufe vorgesehen werden. Neben besonderen Vorkehrungen zur Gasdichtigkeit wurden für diese Kreisläufe Reinigereinheiten und Geräte zur permanenten Gasqualitätsüberwachung eingeplant. Für alle Kreisläufe wurde zusätzlich eine Analysemöglichkeit des Gases in regelmäßigen zeitlichen Abständen vorgesehen.

Detektor- teil(e)	Gasvo- lumen	Gasmischung + Additiv (Volumenverhältnis)	Druck* nominal	Druck* max.	Fluß* max.	Gasqua- lität
Name	[l]	[%]	[Pa]	[Pa]	[l/min]	Aufwand
Planare+ F-MWPCs	-900	Argon/Propan + Ethanol (90/10)+1	Luftdruck +15 ±10	Luftdr. +100	2,5	hoch
Radiale Kammern	-700	1) Argon/Ethan (48/52) 2) Xenon/Ethan/Helium + Isopropanol (20/40/40)+1			1,9	hoch
Radiato- ren	-500	Helium/Ethan (60/40)			1,4	gering
CJC 1	-1140	1) Argon/Kohlendioxid/ Methan (89,5/9,5/1)	105000 ±500	12000 0	3,2	hoch
CJC 2	-3080	2) Argon/Ethan + Was- ser (50/50)+0,5	(absolut)	(abs.)	8,6	hoch
CIZ	-55	Argon/Methan + Wasser (80/20)+0,2	Luftdruck +200 ±20	Luftdr. +500	0,15	mittel
COZ	-240	Argon/Ethan + Isopropa- nol (48/52)+1			0,67	mittel
CIP	-30	Argon/Ethan/Freon®12 + Wasser (49,9/49,9/0,2)+0,2			0,08	mittel
COP	-150	Argon/Ethan/Freon®12 (49,9/49,9/0,2)			0,42	mittel
B-MWPC	-120	Argon/Ethan/Freon®12 (49,9/49,9/0,2)			0,33	mittel

* Werte z.Zt. der Planung, aktuelle Werte siehe Tab. 6.3

Tab. 4.1: Anforderungen an die Kreisläufe der Gasversorgung

nem definiertem Alkohol- oder Wasserdampfzusatz im geschlossenen Kreislauf arbeiten. Die Aufgabe und die Funktion einzelner Elemente werden an dieser Stelle nur kurz skizziert und später in den entsprechenden Kapiteln näher erläutert.

- Der Einlaßteil dient zum Anschluß der erforderlichen Gasflaschen. Der Vordruck an dieser Stelle ermöglicht einen einstellbaren Gasfluß in Richtung der Kammer.
- Im Eingangsbereich "Fluß" befinden sich Elemente zur Einstellung und Überwachung des Flusses zur Kammer. In der offenen Version erfolgt hier die Addition von Alkohol- oder Wasserdampf. Ein kleiner Teilfluß wird in den geschlossenen Kreisläufen zum Anschluß der Geräte für die Gasqualitätsüberwachung abgezweigt.
- Neben Ein- und Auslaßleitung ist an der Kammer ein dritter Gasanschluß zur flußunabhängigen Druckmessung vorhanden. Ein präziser elektrischer Druckwandler liefert den Ist-Wert für die Druckregelung.
- Nach Vergleich mit dem Soll-Wert in einem Mikroprozessor wird sowohl der Kammereinlaß als auch der Kammerauslaß mit Hilfe eines elektromagnetischen Ventils automatisch gesteuert.
- Im Rücklauf der Kammer ist eine Belüftung für Alarmsituationen installiert. Dahinter sind die gleichen Elemente wie im Einlaß, jedoch in umgekehrter Reihenfolge, angeordnet.
- Die treibende Kraft für den Rückfluß wird durch den saugseitigen Unterdruck einer Pumpe erzeugt.
- An der Druckseite dieser Pumpe gelangt das Gas, in der offenen Version, direkt in die Abluft.
- Durch geeignete Ventilschaltung kann auch der geschlossene Kreislauf "offen" betrieben werden. In der geschlossenen Variante gelangt das Gas zunächst in ein Puffervolumen. Es dient zur Aufnahme/Abgabe der Gasmenge, welche bei den unterschiedlichen Schaltzuständen der Ventile zur Druckregulierung der Kammer notwendig ist. Die resultierenden Schwankungen im Vordruck werden durch eine angepaßte Größe des Volumens minimal gehalten. Weiterhin ist in diesem Volumen die Mischung einer kleinen Gasmenge nach Partialdruckmethode möglich. Danach gelangt das Gas direkt oder durch die Reinigereinheit und die wahlweise zuschaltbare Anlage zur Additivbeimischung wieder an den Startpunkt zurück.

Aus Kostengründen ist es angebracht, mehrere Kreisläufe und die zum automatischen Betrieb notwendige Elektronik in einem übergeordneten "Gassystem" zusammenzufassen. Herzstück eines solchen Gassystems ist eine zentrale elektronische Einheit zur Versorgung, Meßwerterfassung, Steuerung und Kommunikation. Es erscheint sinnvoll, die Kammern mit gleichen Anforderungen an die Druckregulierung (vergl. Tab. 4.1) zusammenzufassen. Die Kreisläufe des Forward-Tracking-Detektors, der zentralen Jetkammern sowie die aller übrigen Kammern sind in drei unabhängigen, jedoch nahezu identischen, Gassystemen angeordnet. Diese Wahl ermöglicht eine noch übersichtliche Handhabung der Systeme. Ein zusätzliches, historisches Kriterium für diese Einteilung war, daß für Tests beim Zusammenbau der Kammern des Vorwärtsdetektors im RAL¹, die dazugehörige Gasversorgung (Gassystem I) benötigt wurde. Nach dem Transport aller Komponenten nach Hamburg wurde zum selben Zweck nahezu zeitgleich Gassystem III im DESY in der Halle 5 (H5) eingesetzt, während das Gassystem II zur Versorgung

1. Rutherford and Appleton Laboratory, Didcot, England

der Jetkammern direkt in HERA Halle Nord (HN) installiert wurde. Die wichtigsten technischen Eigenschaften der Kreisläufe, die Zuordnung zu den Kammern sowie Daten zu Entwicklung/Bau und Betrieb mit den original H1-Detektorkomponenten sind in Tab. 4.2 zusammengestellt.

Kammer		Kreislauf		Gassystem	
Name	Anzahl	Nr.	Eigenschaften	Nr.	Daten
F-MWPC + Planare	0 bis 3+ 0 bis 3	1	G/R/A/P	I	Entw.: Nov. 1988 (Aachen) Betrieb: Nov. 1989 (RAL) Betrieb: Aug. 1990 (DESY H5) Betrieb: Dez. 1990 (DESY HN)
Radiale	0 bis 3	2	G/R/A/P	I	
Radiator	3	3	O/P	I	
Spare	0 bis 9	4	O	I	
CJC 1 (+CJC 2)	0 bis 2	1	G/R/A/P	II	Entw.: März 1990 (Aachen) Betrieb: Dez. 1990 (DESY HN)
CJC 2 (+CJC 1)	0 bis 2	2	G/R/A/P	II	
CIZ	1	1	O/A/P	III	Entw.: März 1990 (ZH+AC) Betrieb: Aug. 1990 (DESY H5) Betrieb: Dez. 1990 (DESY HN)
COZ	1	2	O/A	III	
CIP	1	3	O/A/P	III	
COP	1	4	O/A	III	
B-MWPC	1	5	O/A	III	
G: geschlossener Kreislauf (auch offen möglich) O: offener Kreislauf R: Reinigereinheit A: Addition von Alkohol / Wasser / FCKW P: permanente Gasqualitätsüberwachung				ZH: Universität Zürich AC: RWTH Aachen	

Tab. 4.2: Eigenschaften, Zuordnung und Daten der Gassysteme

Die in der Tabelle angegebene Anzahl der Kammern bedarf einer kurzen Erklärung:

- Gassystem I: Jeweils eine der drei F-MWPCs ist mit je einer Planaren Kammer in einem gemeinsamen Gasvolumen installiert, da sie dasselbe Gas benutzen können. Die Kreisläufe 1, 2 und 3 des Gassystems I werden kurz vor/hinter dem Detektor in drei separat einstellbare Teilflüsse geteilt. In den Ersatzkreislauf 4 ("Spare") können außer den Radiatoren alle Kammern übernommen werden. Dieses ist notwendig bei Defekten der Kreisläufe 1 und 2, speziellen Füllvorgängen oder Schwierigkeiten (Lecks...) einzelner Kammern.
- Gassystem II: Die beiden Kreisläufe sind so konzipiert, daß sowohl eine wie auch beide Jet-Kammern gleichzeitig betrieben werden können. Da im Normalfall beide Kammern mit derselben Gasmischung arbeiten, dient ein kompletter Kreislauf als Reserve.
- Gassystem III: Alle fünf Kreisläufe sind vollständig separiert, da zumindest zeitweise alle Kammern mit unterschiedlichen Gasmischungen gefahren werden.

4.3 Anordnung der Gassysteme im H1-Experiment

Nachfolgende Kriterien [SIC85] waren bei der Konstruktion und Installation der Gassysteme im Gebäude des H1-Experiments zu beachten. Alle für das Experiment benötigten Gasvorräte müssen aus Sicherheitsgründen außerhalb des eigentlichen Gebäudes angeschlossen werden. Hauptgefahrenpunkt bei den unter Hochdruck bis 20 MPa (200 bar) stehenden Gefäßen sind Lecks in den angeschlossenen Systemen und Verbindungsleitungen und der damit verbundene Austritt großer Gasmengen. Bei Inertgasen wie Helium, Argon oder Stickstoff besteht Erstickungsgefahr. Bei brennbaren Gasen sowie Gasgemischen mit hohem Kohlenwasserstoffanteil ist die Gefahr eines Brandes oder einer Explosion gegeben (vergl. Tab. F2). Zusätzlich waren die Gasmengen innerhalb des Gebäudes auf ein Minimum zu beschränken und entsprechende Sicherheitsrichtlinien [SIC82] einzuhalten. Das zur Installation verfügbare Raumangebot war stark limitiert und zwang zu einer kompakten Bauweise der Anlagen. Die Aufteilung der Komponenten der drei Gassysteme auf die diversen Standorte im H1-Gebäude sowie die Lage der wichtigsten verbindenden Gasleitungen ist in der Abb. 4.2 dargestellt.

- Der Stickstoff- und Argonbedarf wird aus der über der Flüssigkeit stehenden Dampfphase der großen, im Freien aufgestellten Kryobehälter gedeckt. Gase mit hohem Dampfdruck werden im gut belüfteten Raum 727 an Stationen zur Druckreduzierung angeschlossen. Für Reinstgase oder Gasgemische mit Anteilen höherer Kohlenwasserstoffe stehen Druckmindererstationen im beheizbaren Raum 701 zur Verfügung.
- Von den genannten Orten führt ein System von Gasleitungen in den im ersten unterirdischen Stockwerk gelegenen Raum 601. Der typische Druck in diesen Leitungen beträgt 15 kPa bis maximal 200 kPa (0,15–2 bar) über Atmosphärendruck.
- Im Raum 601 befinden sich, neben zwei Systemen zur Versorgung der "Myon"-Kammern, fast alle Komponenten der drei Gassysteme. Hier sind auch die Steuerkonsolen mit der notwendigen Elektronik und die Überwachungsgeräte installiert.
- Durch einen Schacht führen sämtliche Zu- und Rückleitungen der Kreisläufe in die Experimentierhalle (Stockwerk 1). Der Leitungssinnendruck beträgt maximal 2 kPa (20 mbar) über bzw. unter Atmosphärendruck.
- Hinter der Abschirmung des H1-Experiments in der Halle (1. Stock) sind auf dem Dach des zweistöckigen "Electronic Trailer" (engl. f. Elektronik-Anhänger) die Bauelemente der Gassysteme untergebracht, bei denen die Nähe zum Detektor wichtig ist. Hier erfolgt flußkontrolliert die Verteilung der Gase auf die einzelnen Kammern. Wichtigste Komponenten sind die präzisen Druckmeßgeräte, die den aktuellen Kammerinnendruck möglichst nahe am Detektor fortlaufend messen. Um die Kammern im Alarmfall vor mechanischen Belastungen zu schützen, ist dort zum Druckausgleich ein Belüftungssystem installiert. Weitere Komponenten sind Absolutdruckmesser und Temperatursensoren sowie eine umschaltbare Steuerkonsole zur Kommunikation.
- Die Versorgungs- und Druckmeßleitungen führen von hier aus zur "CDA"² innerhalb des Detektors. In einem ständig mit Stickstoff gespülten Volumen zwischen Außenwand der Tracking-Einheit und dem Innenmantel des Kalorimeters münden die Leitungen an den jeweiligen Kammern.

2. CDA = engl. Abk. für Central Distribution Area

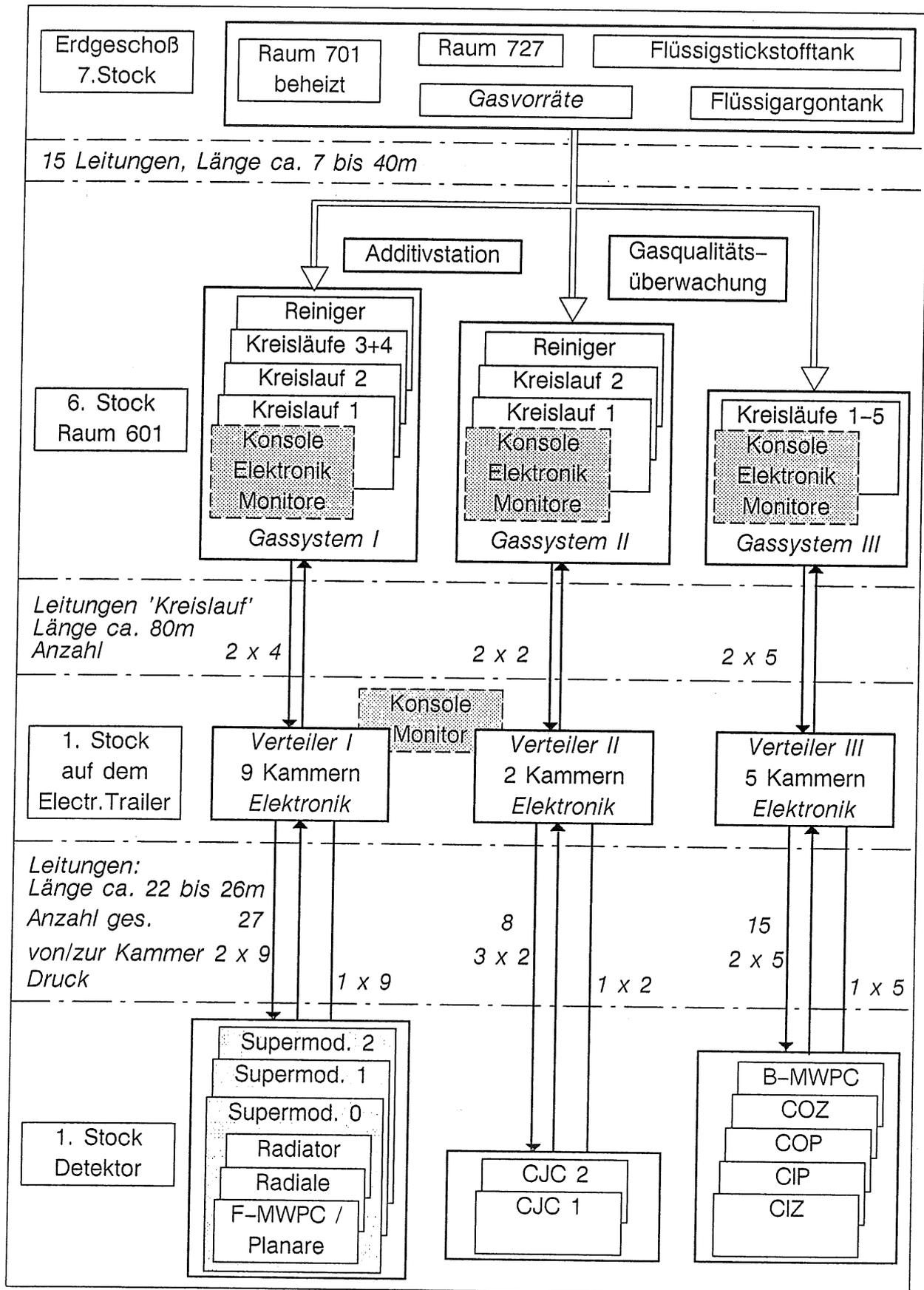


Abb. 4.2: Aufteilung der Gasanlagen und Verbindungsleitungen im H1-Gebäude

4.4 Mechanischer Aufbau der Gassysteme

Der Zeitplan zu Entwicklung, Bau und Test aller Komponenten des H1-Tracking-Detektors war sehr knapp bemessen und die einzelnen beteiligten Institute waren mit limitierter Arbeitskraft ausgestattet. Mit fortschreitender Zeit wurde klar, daß sinnvollerweise alle Gasversorgungsanlagen in Aachen zu erstellen seien. Um die Bedienbarkeit zu erleichtern und die Ersatzteil-Lagerhaltung zu vereinfachen, wurde der mechanische Aufbau in einem einheitlichen Design realisiert. Nach diesen Plänen sind in der mechanischen [MEC88] und der elektronischen Werkstatt [AEE86] des III. Physikalischen Institutes die Gassysteme I und II komplett in Aachen gebaut worden. Die Mechanik von Gassystem III wurde in der Universität Zürich gebaut und in Aachen mit der notwendigen Elektrik und Elektronik ausgestattet. Ausgedehnte Funktionstests und die sicherheitsrelevanten Prüfungen auf Gasdichtigkeit wurden in Aachen durchgeführt. Die bei Konzept und Ausführung zu beachtenden Anforderungen und Ideen werden kurz vorgestellt.

Das zur Verfügung stehende Platzangebot im H1-Gebäude ist auf ca. 30 m² im Raum 601 sowie Stellfläche für 4 Standard-„Racks“ (engl. f. Schrank) auf dem Electronic Trailer begrenzt. Dieses bedingt eine hohe Packungsdichte der Komponenten in den einzelnen Gassystemen.

Da die Systeme vor der endgültigen Installation in unterschiedlichen Labors benötigt wurden (vergl. Kap. 4.3), mußte die Transportfähigkeit und eine schnelle Betriebsbereitschaft in der Planung berücksichtigt werden. Um beide Aspekte zu berücksichtigen, wurde ein modularer Aufbau gewählt. Dabei sind logisch zusammengehörende Komponenten in je einem fahrbaren Standardschrank zusammengefaßt, die elektrisch und mechanisch einfach zu verbinden sind.

Gemäß den schon zitierten Sicherheitsrichtlinien [SIC82, SIC85] wurde die Verrohrung in Kupfer oder Edelstahl mit entsprechenden Verbindern (Swagelok®-Fittings) und Ventilen ausgeführt.

Die Abb. 4.3, Abb. 5.1 und Abb. 7.3 zeigen die Frontansicht der drei Gassysteme. Der erste der abgebildeten Schränke beinhaltet die komplette Elektronik inklusive Bildschirmen, Tastatur und Drucker (vergl. Kap. 4.5) und ist für alle Systeme identisch. Die jeweils bauhöchsten Schränke für den Trailer enthalten neben einem Elektronikeinschub, alle in Kammernähe erforderlichen Bauteile. Die restlichen Schränke dienen zur Aufnahme der gasführenden Elemente, die den Hauptteil der Kreisläufe bilden. Auf der Frontplatte sind die zur manuellen Einstellung und Steuerung notwendigen Handventile, Flußregler und mechanischen Druckmesser installiert. Um Fehler bei der Bedienung zu minimieren, sind konstruktive Details, die der Übersichtlichkeit dienen, realisiert worden:

- Die einfachen Ventile mit der Funktion auf/zu haben schwarze Handgriffe und sind mit den Drei-Wege-Ventilen (blaue Griffe) nicht zu verwechseln. Alle Ventile sind in waagerechter Position des Handgriffes geschlossen.
- Die auf der Frontplatte angebrachten Hilfslinien und Beschriftungen entsprechen der Verrohrung der Elemente und sollen optisch den Gesamtzustand schnell erfaßbar machen. Zum Kreislauf gehörende Elemente (Pumpen, Filter, elektrische Ventile,...), die innerhalb des Racks untergebracht sind, werden durch Schilder mit dem logischen Namen an den entsprechenden Stellen im Frontplan repräsentiert. Die verwendete Nomenklatur aller Elemente (vergl. Anhang A) ist in den Verrohrungsplänen und der Bediener-

software identisch.

– Zur schnelleren Orientierung wurden folgende Farben in allen Systemen mit gleicher Bedeutung verwendet:

weiß – Zuordnung zu mehreren Kreisläufen;

blau – Kreislauf 1 (entspricht in den Unterlagen "Cir. 1"; engl. Abk. für 'Circuit');

pink – Kreislauf 2; *gelb* – Kreislauf 3; *mint* – Kreislauf 4; *hellblau* – Kreislauf 5.

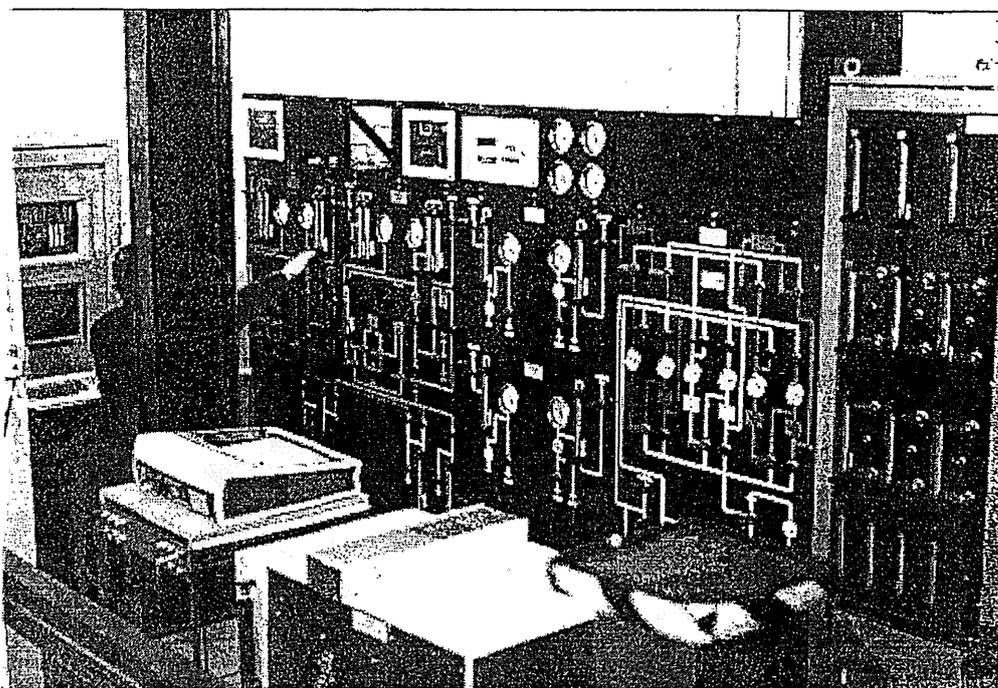


Abb. 4.3: Die Racks von Gassystem I (von links): Elektronik, Cir.1, Cir.2, Cir.3/4, Reiniger und Trailer (Photo RAL)

– Beim Layout der Frontplatten wurde in den individuellen Kreisläufen darauf geachtet, daß Teile mit ähnlichen Aufgaben leicht wiederzufinden sind; z.B. sind die Ventile zur Abtrennung der Kammer(n) vom Kreislauf immer oben links und rechts angebracht.

– Weitere Meß- und Anzeigergeräte sind in einem zum Transport abnehmbaren Aufsatz untergebracht.

Wie aus Tab. 4.2 ersichtlich, ist die Ausstattung der Kreisläufe verschieden, was zu einer unterschiedlichen Anzahl zu installierender Bauelemente und somit individuellem Platzbedarf führt. Die fünf einfachen Kreisläufe in Gassystem III sind in dünnem Kupferrohr mit 6 mm Außendurchmesser und 1 mm Wandstärke ausgeführt und lassen sich in einem einzigen Schrank übereinander unterbringen (siehe Abb. 5.3). Die relativ kleinvolumigen Pumpen stehen direkt auf dem Boden, um Vibrationen der Installation zu verhindern. Beim Blick auf die geschlossenen Kreisläufe der Gassysteme I und II (siehe Abb. 4.4 und Abb. 7.4) sind die 80 Liter Vorratsbehälter ("Barrel") sowie die elektrischen Verbindungen zu erkennen. Die elektrischen Leitungen verlaufen innerhalb an den Seiten angebrachter Kabelkanäle. Die elektrische Verbindung zu den weiteren Racks bzw. zur Steuerkonsole erfolgt über das platzsparend konstruierte "interne Bussystem" (vergl. Abb. 4.4) mit rastbaren Steckverbindungen. Weiterhin sichtbar ist die Verrohrung, die in 10 mm

Außendurchmesser Kupferrohr ausgeführt ist, um den größeren Gasflüssen Rechnung zu tragen. Um trotz der hohen Packungsdichte noch Arbeiten im Innern der Racks durchführen zu können, sind die Gasanschlüsse in allen Racks standardisiert und mit festem Nummernschema (vergl. Tab. E2) zentral oben angeordnet.

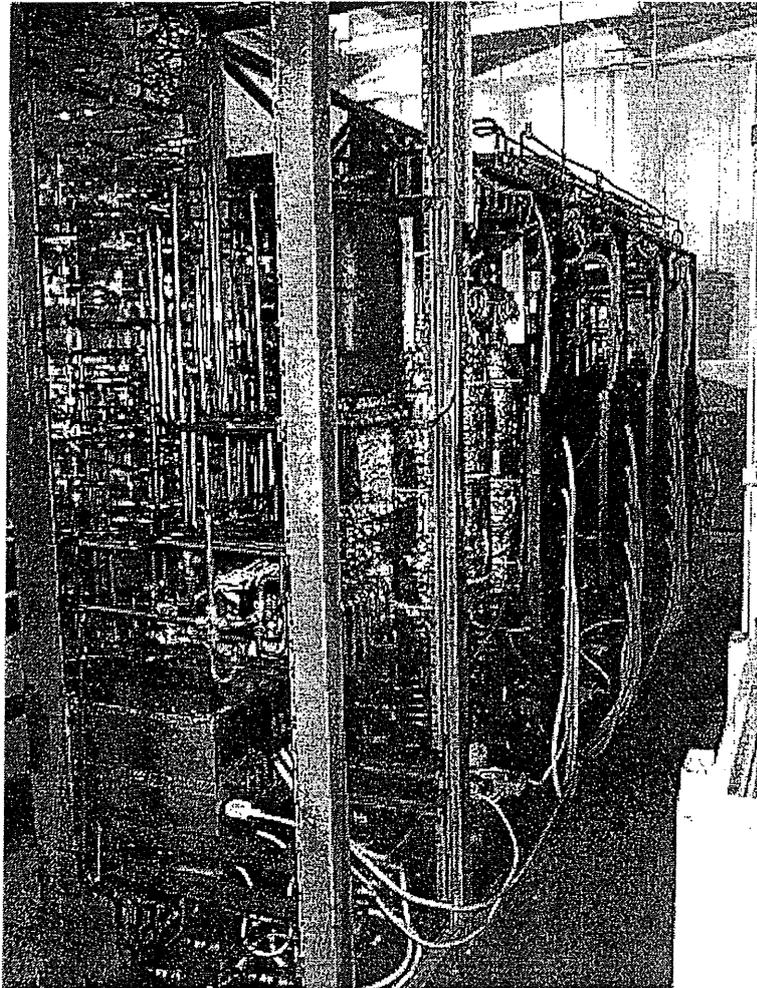


Abb. 4.4: Rückansicht von Gassystem I (Photo RAL)

Die Ausführung weiterer Anlagenteile wie Gasflaschenstationen, automatische Analysestation und die Anlage zur Zumischung der Additive werden in späteren Kapiteln beschrieben.

4.5 Elektronik der Gassysteme

Das stärkste Argument für den Einsatz von Elektronik in den Gassystemen ist, daß für den erforderlichen Meßbereich der Kammerdruckregelung kein einfaches, mechanisches Regelsystem erhältlich ist (Maximaldruck: $p_{max} < 1 \text{ cm H}_2\text{O} - 100 \text{ Pa} = 1 \text{ mbar}$).

Die Aufgaben der Elektronik für einen automatischen Betrieb der Gassysteme sind Meßwerterfassung, Steuerung und Regelung. Weiterhin werden wichtige Größen kontinuierlich überwacht, protokolliert und gegebenenfalls entsprechende Alarmer generiert. Zusätzlich ist eine Kommunikation mit dem Operateur und diversen Systemen des Experiments not-

wendig. Einen Überblick über die Elektronik eines der drei Gassysteme und die Einbindung in das H1-Experiment bietet die Abb. 4.5.

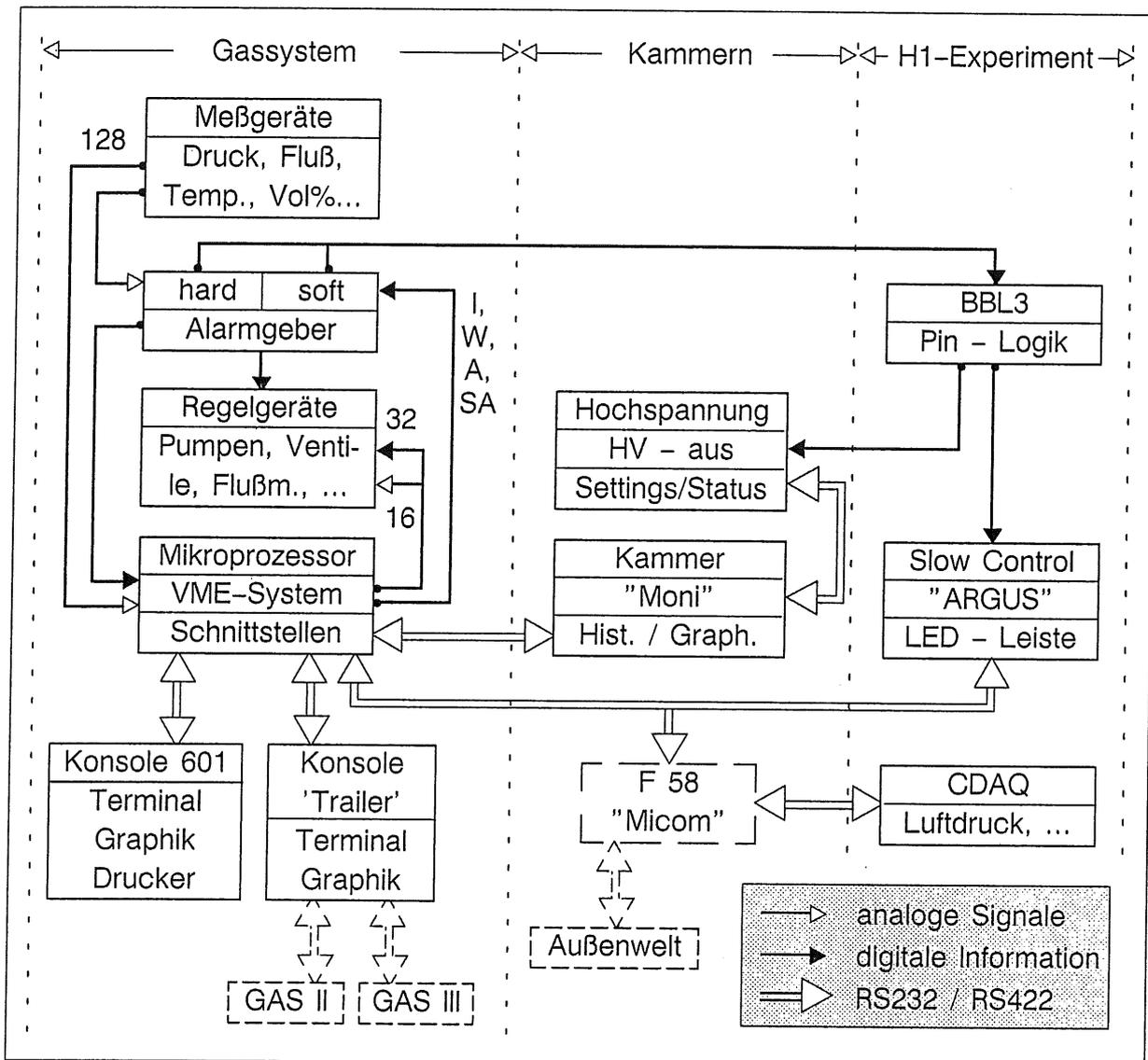


Abb. 4.5: Funktionsdiagramm Elektronik und Hauptdatenflüsse für Gassystem I

Die Steuerung der Gassysteme führt je ein Mikroprozessor-Einschub [COM87] in einem VME-System durch (siehe Tab. C1 und [COM89]). Diese Wahl wurde getroffen, weil eine Anzahl gleicher Module für die Ausselekttronik der TEC im L3-Experiment seit 1986 eine hohe Betriebssicherheit bewiesen hatte und schnell verfügbar war [BEI86, BEI89]. Der Mikroprozessor liest bis zu 128 Meßinstrumente aus und steuert mit 32 digitalen und 16 analogen Kanälen die Regelgeräte. Vom angeschlossenen privilegierten Terminal aus kann in diese Steuerung eingegriffen werden. Um Veränderungen schnell und einfach zu erkennen, steht im Raum 601 sowie auf dem Electronic Trailer zusätzlich je ein Graphik-Monitor zur Verfügung. Dort können die wichtigsten Meßwerte oder deren zeitlicher Verlauf gleichzeitig mit dem Betriebszustand des Gassystems beobachtet werden [KOS89]. Auf einem Drucker werden die wichtigsten Veränderungen sofort und außerdem ein stündliches Protokoll des Zustandes ausgegeben, um später Fehlfunktionen

und deren Ursachen feststellen zu können. Über weitere Schnittstellen (RS232/RS422) können – mit einem reduzierten Befehlssatz – alle Informationen des Gassystems vom Computer der jeweiligen Kammer (Programm: MONI) und der Experiment Slow Control (System: Argus) abgerufen werden. Die direkte Kommunikation mit der zentralen Datenerfassung (engl.: CDAQ = Central Data Aquisition) und der Außenwelt erfolgt über das DESY-Netzwerk [MICOM]. Um Schäden an den Kammern und Gefahren zu vermeiden, sind unabhängige Hard- und Software Kontrollsysteme eingebaut. Bei Fehlverhalten wird automatisch das System hardwaremäßig in einen definierten und sicheren Aus-Zustand gefahren und die entsprechenden Alarmmeldungen werden erzeugt. Die unterschiedlichen Alarme (s.u.) der drei Gassysteme werden zu einer Sammelstation (BBL3) [POT89] im Electronic Trailer übertragen, wo alle relevanten Alarme des Experimentes auflaufen. Hier werden durch eine steckbare Steuerlogik ("Pin-Logik") die Hochspannungen der Kammern im Alarmfall abgeschaltet und blockiert. Zur schnellen optischen Erfassung gibt es für alle Gasalarme zusammen eine Leuchtdiodenanzeige im Hauptkontrollraum des Experimentes.

a) Hardwareschaltungen und -alarme

Aus Gründen der Universalität und der wirtschaftlichen Ersatzteil-Lagerhaltung ist die modular aufgebaute Elektronik der drei Gassysteme exakt baugleich. Ein kompletter Reservesatz ist somit universell einsetzbar und ermöglicht bei Hardware Upgrades (engl. f. Weiterentwicklungen) einen schnellen Austausch. Zur Kommunikation mit den Meß- und Regelgeräten des Gassystems ist die Verschaltung der wichtigsten Komponenten der Elektronik in Abb. 4.6 dargestellt.

– In jedem Gassystem ist der erste Schrank mit Gasinstallationen über das "interne Bussystem" an der "Distribution Box Level 6" des Elektronischschrankes in Raum 601 angeschlossen (vergl. Tab. C2). Alle Meß- und Regelgrößen sowie sämtliche Versorgungsspannungen stehen durch eine 1:1 Fortführung des Bussystems in jedem weiteren angeschlossenen Gasrack zur Verfügung. Von der Distribution Box führt ein ca. 100 m langes Kabel zu einer weiteren Distribution Box (Module siehe Tab. C3), die im Gasrack auf dem Electronic Trailer eingebaut ist.

– Alle Meßsignale werden zunächst in der Distribution Box durch einen Paßfilter von Störsignalen befreit und Ströme in Spannungen konvertiert. Jeder der 128 Analogmeßwerte kann von der Software unabhängig mit Hilfe der Limit Card "LC" überwacht werden. Bei Überschreiten der über Potentiometer einstellbaren Toleranzen wird dort ein "Hardware-Super-Alarm" ausgelöst (s.u. und "LCC" in Tab. B2 bis Tab. B5). Die analogen Meßspannungen werden im 256 Hz-Takt von den 12 Bit ADCs zur Rechnerbearbeitung digitalisiert. Über den VME-Bus werden die Werte vom Mikroprozessor im Crate Master abgerufen.

– Nach Maßgabe der Software werden zwei unterschiedliche Typen von Steuerungen aktiviert. Für den Typ Ein- / Ausschaltung werden die logischen Signale des DI/O (engl.: Digital Input/Output) in der Distribution Box in 24 Volt Leistungssignale umgesetzt (VDM) und über das interne Bussystem verteilt. Die Ventile werden direkt, die Heizungen über dimmbare Triacschaltungen und die Pumpen über Überstromschutzschalter und Triac angesteuert. Für die Massenflußregler (nur Gassystem III) wird eine analoge Steuerspannung im DAC (engl.: Digital to Analog Converter) bereitgestellt.

– Die in Echtzeit ablaufenden Zyklen des Mikroprozessors werden mit mehreren einfachen elektronischen Schaltungen ("Watch-Dog") einmal pro Sekunde überwacht. Erfolgt innerhalb dieser Zeit keine entsprechende Rückmeldung, so wird im Modul DI/O der "Watch-Dog-Alarm" ausgelöst.

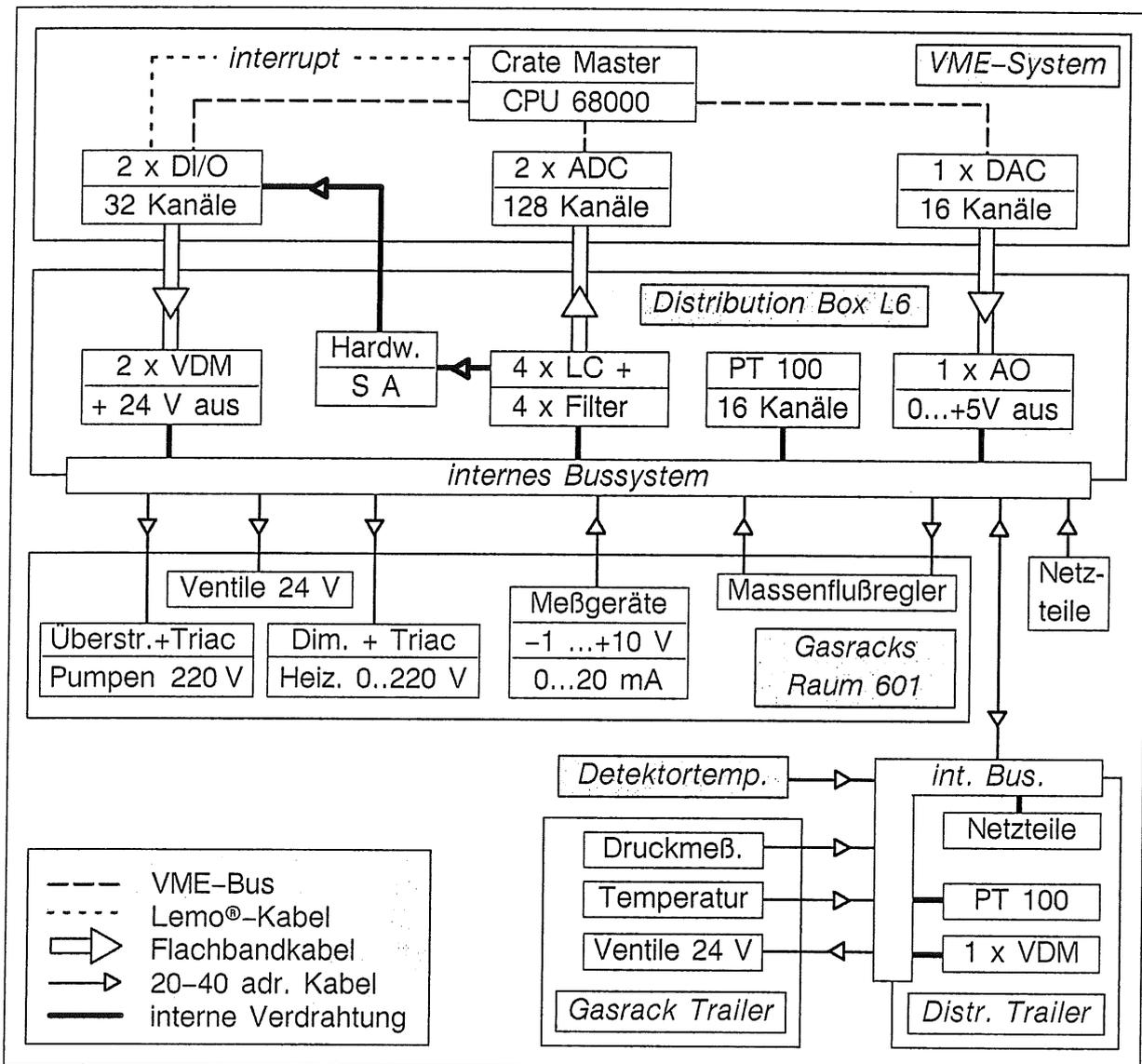


Abb. 4.6: Verschaltungsschema Elektronik mit Gassystem-Hardware

– Der Hardware-Super- und der Watch-Dog-Alarm verursachen über das DI/O eine entsprechende Meldung, ein Stoppen der Software-Steuerverfahren und über die "Interrupt"-Leitung die Abschaltung sämtlicher angeschlossener Regelgeräte. Durch Schließen der Magnetventile und Massenflußregler wird der Gasstrom zum Gassystem und zu den Kammern unterbrochen. Der Hardware-Super-Alarm ist der höchst mögliche Alarmniveaus und schaltet als einziger die Spannungsversorgung der stromlos offenen Belüftungsventile für die Kammern ab. Zum Wiederanfahren des Gassystems ist ein manuelles Zurücksetzen der Alarme vor Ort notwendig.

b) Software und -alarme

Das zum Betrieb der Elektronik notwendige Programm ist ebenfalls streng modular aufgebaut und für die drei Gassysteme vom Grundprinzip her identisch. Durch "conditional if"-Abfragen wird der Einbau der spezifischen Meß- und Regelinstrumente mit den dazugehörigen Steueralgorithmen für die einzelnen Systeme individuell generiert. Um hohe Geschwindigkeit bei der Meßdatenerfassung und Steuerung zu erreichen, ist die Software in Assembler geschrieben [HAN88] und befindet sich in einem leicht austauschbaren Eprom des Moduls "SPY-M" (vergl. Tab. C1). Nach Software-Weiterentwicklungen in Aachen kann das komplette Programm einfach und sicher nach Hamburg transportiert und ohne große Unterbrechung im Gassystem ausgewechselt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, das Programm direkt via Netzwerk über den Paralleleingang "CP" (engl. Communication Port) des Crate Masters zu laden.

```
GAS1_CIR 4 > sh proc
```

index	name	status	I/O	% CPU	act.PC*	act.SP*	min.free*
8	grafic	rdy	-/-	25.9	75564E	79A5A0	0122
12	heat_control	wai 7	-/-	0.0	753D3E	799F92	0094
4	log_printer	wai 10	TT3/TT3	0.2	75822E	79C950	01F2
0	null	rdy	-/-	15.5	750254	79FFC2	00C4
11	plot	rdy	-/-	13.5	7586E2	79A0C2	00B8
3	slow_control	wai 1	TT2/TT2	0.7	755C0E	79D7E0	03EA
10	time	wai 1	-/-	2.2	753576	79A17C	0072
1	user0	wai 1	CP/CP	0.2	755BA0	79F5E8	06DA
2	user1	wai 1	TT1/TT1	0.6	755C0E	79E5E0	02C0
6	user2	wai 1	CTY/CTY	0.5	755C0E	79ADE0	0292
5	user4	rdy	TT4/TT4	8.3	75097A	79BAC4	0386 <==
7	watch	rdy	-/-	30.2	75E360	79A7AE	0058
9	window	hib	-/-	0.0	7537CC	79A3AE	0128
total				97.8			

act.PC	- aktueller Programmzähler
act.SP	- aktueller Zeiger im Rechenregister (Stack Pointer)
min.free	- freier Platz im Register

Abb. 4.7: Kontrollausdruck des Programms mit den aktuellen Parallelprozessen; Abfrage von Aachen aus über F58 Terminal Switch, als "user4" in Gassystem I

Das Programm ist als "multitasking"-System so aufgebaut, daß für die wichtigen Aufgaben in festen zeitlichen Abständen genügend Rechnerleistung zur Verfügung steht [RIN91]. Die Prozesse zur Auslese der Meßgeräte, zur Regelung des Kammerdrucks sowie die Alarmverarbeitung werden mit höchster Priorität abgearbeitet. Asynchron dazu gibt es noch "sharable processes". Das sind teilbare Prozesse niedriger Priorität, die dann ablaufen, wenn noch Rechenzeit übrig ist. Das sind beispielsweise weniger wichtige Steuerprozesse innerhalb des Gassystems, Prozesse zur Kommunikation mit den oben genannten Terminals und der Graphik. Mit dem Kommando "show processes" (Abb. 4.7)

kann Information über den momentanen Zustand der Prozesse abgefragt werden. Befehle, die den Zustand des Gassystems ändern, können nur von einem privilegierten Terminal aus erfolgen. Dieses sollte entweder "CTY" in Raum 601 oder "TT1" am Trailer sein. Der komplette Befehlssatz ist ausführlich in [HAN92] beschrieben.

Neben dem Innendruck der diversen Kammern unterliegen weitere physikalische Größen einer programmgesteuerten Regelung (Tab. 4.3). So muß die Temperatur in der Station zur Beimischung von Additiven für sechs Kreisläufe separat reguliert werden. In den geschlossenen Kreisläufen wird zusätzlich die Temperatur der Gasreiniger sowie der Druck in den Vorratsbehältern geregelt.

Regelung der physik. Größe	Meßwert	Regelgerät		Anzahl der Regelungen		
	log. Name		log. Name	GAS I	GAS II	GAS III
Kammerinnendruck	PTX-1	elektr.	SVX-2, SVX-3	4	2	5
Druck im "Barrel"	PTX-3	Ventile	SVX-1, SVX-5	2	2	0
Temp. Reiniger	TS9-Y	Heizung	HE9-Y	6	4	0
Temp. Additiv	TSX-Y	Heizung	HEX-Y	2	1	3

X=Nummer des Kreislaufs; Y=laufende Nummer (vergl. Anhang A, B)

Tab. 4.3: Die wichtigsten Regelkreise des Programms zur Steuerung der Gassysteme

Zum Verständnis der Funktionsweise sei ein Regelprozeß skizziert:

Der aktuelle Ist-Wert steht, wie oben beschrieben, als Meßwert ständig zur Verfügung. Ein kompletter Satz von Standardsollwerten und Regeltoleranzen ist im Programm implementiert und kann via Terminal geändert werden. Im einfachsten Fall wird bei Überschreiten der Soll-Wert Grenzen ein Regelgerät geschaltet. Zur Aktivierung wird der entsprechende Regelprozeß vom Terminal aus auf Automatik gesetzt (Kommando: 'set "Name der Regelung" auto'). Die zur Steuerung notwendigen Regelgeräte können danach ausschließlich von diesem Prozeß aus bedient werden. Im Modus MANUAL ('set "Name" manual') sind die Geräte einzeln schaltbar, während im Modus OFF ('set "Name" off') kein Zugriff möglich ist. Befindet sich eine der Regelungen im Modus MANUAL, so wird automatisch der entsprechende Kreislauf mit einem WARNING-Status versehen. Der Benutzer wird durch ein "W" im Terminal-Prompter und die Farbe "gelb" auf dem Graphik Schirm (s.u.) ständig daran erinnert, bei Verlassen des Raumes das Gassystem wieder in einen sicheren Zustand zurückzusetzen.

Unabhängig von den verschiedenen Regelungen können alle eingelesenen Meßwerte per Programm überwacht werden. Hierzu gibt es eine Anzahl von Grenzwerten, die bei Überschreitung durch den Ist-Wert des Meßgerätes ein abgestuftes System von Alarmen aktivieren. Zur Verdeutlichung sei am Beispiel des Kammerdruckmessers "PT2-1" (Pressure Transducer, Circuit 2, No. 1) die Struktur der Parameter erklärt (vergl. Tab. A3). Die Parameter für die Regelung $PT2-1R$ und die Alarmniveaus $PT2-1W$, A , SA , sind aus Gründen der einfacheren Bedienung als Intervall definiert. Per Software werden diese vom Nominalwert $PT2-1N$ abgezogen und dazu addiert, um die minimale bzw. maximale Gren-

ze absolut zu berechnen. Erreicht z. B. der gemessene Kammerdruck $PT2-1$ die obere Regelgrenze $+PT2-1NR$ ($= PT2-1N + PT2-1R$), so wird das Ventil $SV2-2$ geschlossen und der Gasfluß zur Kammer gestoppt (Abb. 4.8). Bei Auftreten von Alarmen muß – nach Beseitigung der Störung – zuerst der Status am privilegierten Terminal zurückgesetzt werden, um die Regelungen erneut zu aktivieren.

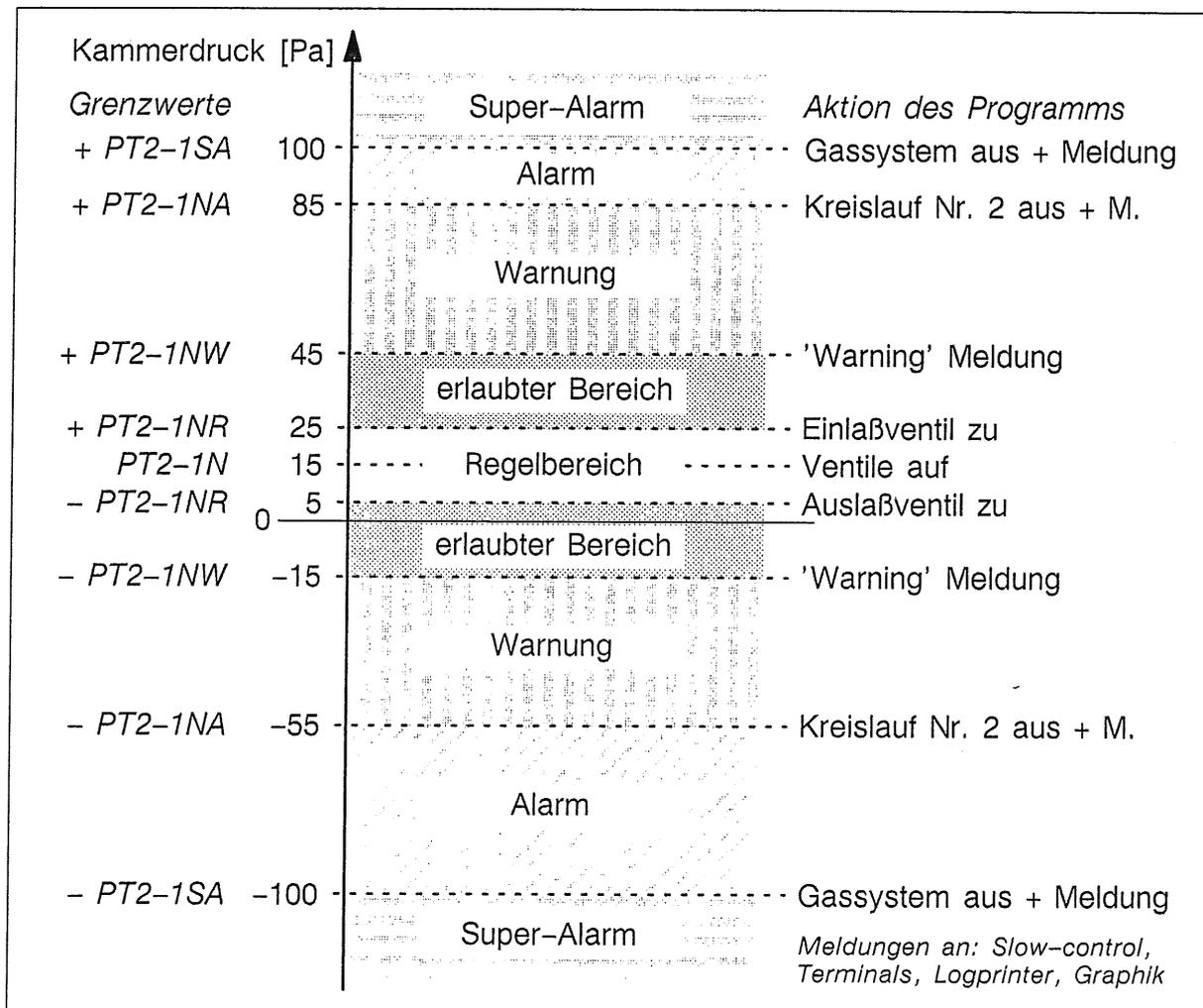


Abb. 4.8: Parameter zum Meßwert des Kammerinnendrucks "PT2-1"

c) Graphik

Die beiden Graphik-Monitore dienen dazu, den Status aller Kreisläufe des Gassystems, den Schaltzustand der elektrischen Ventile und die wichtigsten aktuellen Meßwerte des selektierten Kreislafes auf einen Blick zu erfassen [KOS89]. Als Beispiel ist in Abb. 4.9 die Bildschirmanzeige von Gassystem I mit selektiertem Kreislauf 3 dargestellt.

– Die Hauptflüsse und Kammerinnendrucke werden für alle Kreisläufe in der Kopftabelle bzw. am rechten Bildrand einmal pro Sekunde aktualisiert.

– Weitere wichtige Informationen werden durch entsprechende Farbgebung übermittelt. Die Farbe der Leitungen im dargestellten Kreislaufdiagramm ist identisch mit der Farbe der Hilfslinien des dazugehörigen mechanischen Aufbaus.

- Um die Schaltzustände der Ventile und Pumpen zu charakterisieren, sind die Symbole grün (offen/an) bzw. rot (geschlossen/aus) unterlegt.
- Im Normalfall ist der Bildschirmhintergrund grau und wechselt bei Statusänderung nach gelb (Warning), rot (Alarm) sowie rot mit zusätzlichem roten Rahmen (Super Alarm).
- Die Information über die weiteren Kreisläufe ist im Statusfenster oben rechts ersichtlich.
- Bei Eingriffen in die Regelung des Gassystems ist es hilfreich, den zeitlichen Verlauf eines bestimmten Meßwertes zu verfolgen. Ein entsprechendes Diagramm kann mit der Option PLOT zusätzlich auf dem Monitor dargestellt werden.
- Alternativ dazu können alle aktuellen Meßwerte gleichzeitig in Form eines Balkendiagramms dargestellt werden.
- Die Anzeige für die beiden anderen Gassysteme ist, bis auf die Anzahl der Kreisläufe und die Anordnung der Kammern, nahezu identisch.

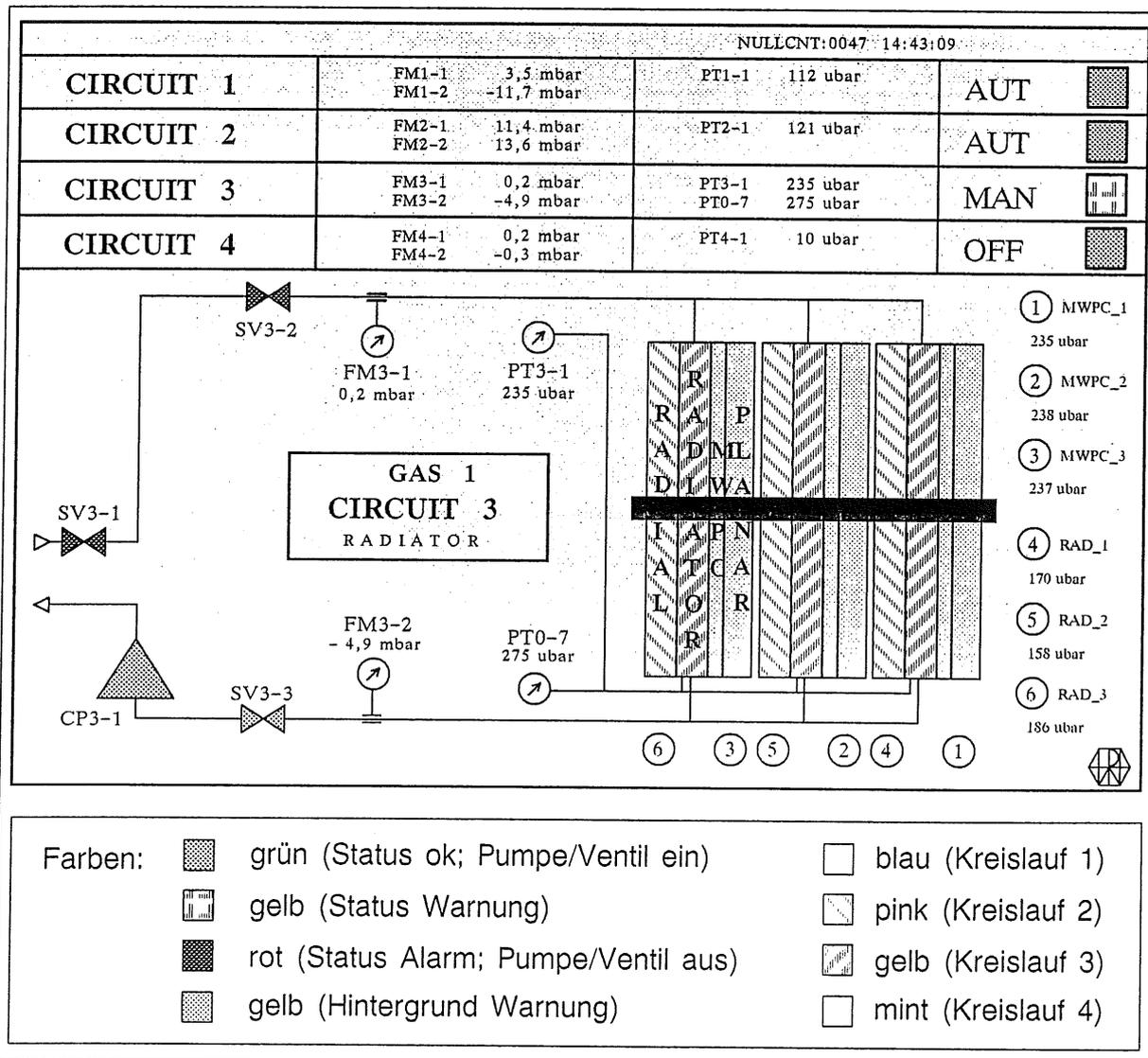


Abb. 4.9: Beispiel der Standard-Graphikanzeige von Gassystem I

5. Herstellung der Gasgemische

Die verschiedenen Herstellungsverfahren von Kalibrationsgasgemischen werden dargestellt und auf die Verwendbarkeit in den H1-Gassystemen untersucht. Hieraus ergeben sich Aufgaben, die sinnvollerweise innerhalb der Gasversorgungsanlage zu erledigen sind. Abschließend werden die hierzu erstellten Anlagenteile und experimentelle Resultate vorgestellt.

5.1 Herstellungsverfahren von Prüfgasgemischen

Vier der zur Zeit üblichen technischen Methoden zur Herstellung von Gemischen aus Reinstgasen werden vorgestellt. Die Verfahren unterscheiden sich im apparativen Aufwand und in der Genauigkeit des Mischungsverhältnisses. Für den Betrieb von Drahtkammern ist jedoch nicht so sehr die absolute Genauigkeit wichtig, sondern die Langzeitstabilität und Wiederholbarkeit. Diese sollte allerdings auf dem Volumenprozentniveau gewährleistet sein. Damit die Konzentrationen in den Gassystemen überwacht werden können, braucht man zur Kalibration der Analysegeräte ebenfalls Gasgemische mit ausreichender absoluter Genauigkeit (vergl. Kap.8.). Bei der Auswahl der Verfahren ist zu beachten, daß neben dem korrekten Verhältnis der Hauptgaskomponenten zusätzlich Additive mit einem geringen Volumenanteil von etwa 0,2 bis 1 Vol% zugesetzt werden sollen (vergl. Tab. 4.1).

a) Gravimetrische Methode

Die genauesten käuflichen Gasgemische werden nach der gravimetrischen Methode [ISO01] hergestellt (Tab. 5.1). Unter günstigen Bedingungen und je nach Eigenschaften der verwandten Gase kann eine Genauigkeit von 0,1 Vol% einer Komponente (= 0,1% rel.) erreicht werden. Diese Präzision liegt über der praktisch erzielbaren Anzeigerichtigkeit sämtlicher gasanalytischen Geräte. Zur Vorbereitung wird eine Gasflasche von typ. 70 kg bei einem Rauminhalt von 50 l gereinigt, ausgeheizt, evakuiert und das Leergewicht bestimmt. Die erste Gaskomponente wird eingefüllt und erneut gewogen. Entsprechend wird mit jeder weiteren Komponente verfahren. Das Mischungsverhältnis ergibt sich aus dem Verhältnis der eingewogenen Massen, bezogen auf die jeweiligen Molmassen. Um die Genauigkeit der Wägung zu erreichen, muß die Flasche jedesmal von der Gasversorgung getrennt werden. Vor jeder Wägung muß sie sich mindestens einen Tag lang in klimatisierten Räumen auf gleiche, homogene Temperatur mit der Waage einstellen. Ebenso muß die Flasche mit großer Sorgfalt vor Beschädigungen geschützt und jede Art von Gaslecks vermieden werden. Die Grundgenauigkeit dieser Methode hängt von der Genauigkeit der Spezialwaagen ab, die in der Regel besser als 10^{-5} der Last ist [ISO01,

LIN03, BHR84]. Diese Anforderung erwächst aus dem ungünstigen Verhältnis der eingewogenen Gasmassen zur Masse der leeren Gasflasche. Deshalb liefert das Verfahren bei Mischungen mit kleinen eingewogenen Massen eine reduzierte relative Genauigkeit (Tab. 5.1). Hierbei handelt es sich um Komponenten mit niedrigem Dampfdruck oder kleinem Anteil am Gesamtgemisch. Weitere Fehlerquellen sind Temperatur-, Luftdruck- und Feuchtigkeitseinflüsse sowie Auftriebsänderungen beim Wiegen. Darüber hinaus können Anlagerungen der Gaskomponenten und der Luft auf der Flaschenoberfläche stören. Um diese Methode anzuwenden, müssen vollklimatisierte Räume, Wägemöglichkeit unter reduziertem Luftdruck sowie exakte Waagen aufgebaut werden. Eine Automatisierung ist nicht realisierbar.

<i>gravimetrisch</i>	Genauigkeit mind.		<i>manometr./dynam.</i>	Genauigkeit mind.	
	Konzentration der Komponenten	Herstellung		Analyse	Konzentration der Komponenten
2–50% abs.	±0,1% rel.	±1% rel.	5–50% abs.	±2% rel.	±2% rel.
0,01–2% abs.	±0,5% rel.	±1% rel.	0,1–5% abs.	±5% rel.	±2% rel.
5–100 vpm abs.	±1% rel.	±2% rel.	10–1000 vpm abs.	±10% rel.	±5% rel.
1 vpm (volume per million) = 1 ppm _v (parts per million by volume) = 1 · 10 ⁻⁶					

Tab. 5.1: Vergleich der Herstellungs- und Analysengenauigkeit kommerziell erhältlicher Prüfgasgemische aus [LIN02] (vergl. auch [BOC01, MGR01, AGA01])

b) Manometrische Methode

Bei der Anmischung über den Partialdruck der Einzelkomponenten garantieren die Hersteller eine Genauigkeit von bis zu 2% relativ (Tab. 5.1). Bei Komponenten mit Idealgasverhalten ist eine Genauigkeit von 1% relativ erreichbar [ISO02], was ungefähr der Wiederholungspräzision mit Realgasen entspricht. Wie oben wird zunächst eine Gasflasche vorbereitet. Danach werden die Komponenten nacheinander bis zu einem vorher über Zustandsgleichungen berechneten Druck eingefüllt. Während des Vorgangs muß die Temperatur gemessen und entsprechende Korrekturen berücksichtigt werden. Das Mischungsverhältnis ergibt sich aus den Teildrücken, die beim Füllen der Komponenten erreicht worden sind. Der größte Fehler dieser Methode liegt in der Abweichung vom Idealgasverhalten. Lecks und Volumenvergrößerung des Gasbehälters durch Druckerhöhung beim Füllvorgang tragen zum Fehler bei. Dagegen können Fehler in der Druck- und Temperaturmessung durch Auswahl genauer Geräte klein gehalten werden. Die Fehlerquellen aus dem Realgasverhalten und der Elastizität der Bauelemente können als systematische Abweichung vom angestrebten Molenverhältnis behandelt werden. Dies gilt nur dann, wenn Rezeptur, Mischanlage und Flaschen identisch sind.

c) Dynamische volumetrische Verfahren

Diese kontinuierlichen Verfahren beruhen darauf, daß alle Reinstgaskomponenten mit jeweils definiertem Fluß parallel in einen Mischbehälter eingefüllt werden. Die diversen Verfahren [ISO03] unterscheiden sich in der Methode zur Definition des Flußverhältnisses. Realisierbar sind damit Volumenanteile von 1 bis 10⁻⁸. Für den im H1-Experiment benötigten Bereich von 0,1 bis 100 Vol% sind der Massenflußregler mit einer Variationsbreite

von 1%–rel. und die Flußregelung durch eine Schallausflußöffnung (Var. 0,5%–rel.) die empfohlenen Verfahren. Die absolute Genauigkeit kann nur gegen eine andere Methode geeicht werden. Beim Massenflußmesser wird der Wärmetransport des durchströmenden Gases gemessen. Vor und hinter einem beheizten Teilstück eines Kapillarrohres wird die Gastemperatur gemessen und die Differenz bestimmt. Das Kapillarrohr ist parallel zum Hauptfluß geschaltet. Damit die Flüsse stets proportional zueinander sind, wird im Hauptfluß mit einer Blendenkombination eine konstante Druckdifferenz erzeugt. Neben apparatbedingten Korrekturen ist die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p die gasartabhängige, physikalische Umrechnungsgröße. Zur Regelung des Massenflusses wird meist ein Ventil mit Gleichstromtauchspule eingesetzt.

Bei der zweiten Methode wird mit einer kleinen Blendenöffnung eine konstante, überkritische Strömung erzeugt. Die Öffnung muß mindestens fünf mal kleiner als der Rohrdurchmesser sein. Um eine Unabhängigkeit vom Vordruck zu erreichen, sollte der auf 0,1% zu stabilisierende Eingangsdruck größer als der dreifache Ausgangsdruck sein. Zur Bestimmung des Massenflusses werden neben den geometrischen Parametern der Eingangsdruck und die Temperatur benötigt.

Diese Methoden haben den Vorzug, daß Gasmengen kontinuierlich am Ort des Verbrauchs hergestellt werden können, wobei die Reinstgase platzsparend in flüssiger Form gelagert werden können.

d) Sättigungsmethode

Diese Methode der kontinuierlichen Zumischung findet Anwendung, falls eine der Gasbestandteile bei Normalbedingungen in flüssiger Phase vorliegt. Drückt man die Konzentration als Partialdruckanteil aus, so können hiermit Genauigkeiten von etwa 3%–relativ erreicht werden [ISO04].

Im Gleichgewichtszustand hängt der Dampfdruck einer Reingaskomponente über der Flüssigkeit ausschließlich von der Temperatur ab. Leitet man eine Gasmischung durch einen teilweise mit Flüssigkeit der Zumischkomponente gefüllten Behälter, so ist das austretende Gas mit dem Satttdampfdruck dieser Komponente angereichert.

Die Genauigkeit hängt von der Messung des Gesamtdrucks im Mischbehälter und dem Dampfdruck der Komponente ab. Der Gesamtdruck ist relativ einfach mit hinreichender Präzision zu bestimmen. Die Genauigkeit von Temperaturmessung und –regelung, Reinheit des eingeleiteten Vorgemisches und die Verlässlichkeit der Dampfdruckkurve beeinflussen die Präzision der Bestimmung des Dampfdruckes.

Zur Eichung der Analysegeräte und der vergleichenden Kontrolle von Kammergasgemischen, die mit anderen Methoden hergestellt werden, ist die gravimetrische Methode unverzichtbar. Der konkurrenzlos guten absoluten Genauigkeit steht jedoch nur eine dem Partialdruckverfahren vergleichbare Reproduzierbarkeit gegenüber. Der Grund liegt darin, daß beim Füllen ebenso die Druckmessung verwendet wird und die Genauigkeit erst durch die nachfolgende Wägung erreicht wird. Die hohen Investitionskosten, fehlende räumliche Möglichkeiten, der im Verhältnis zum Aufwand geringe Gasmengenbedarf und der hohe Personalaufwand sprechen jedoch gegen die Erstellung einer solchen Anlage für das H1-Experiment.

Die Anforderungen Langzeitstabilität und Reproduzierbarkeit des Mischungsverhältnisses sind am ökonomischsten mit der Partialdruckmethode zu erfüllen. Voraussetzung ist hier,

daß die Herstellung immer nach derselben Verfahrensweise auf einer Anlage und möglichst von demselben Personal erfolgt. Möglichkeiten zur Herstellung von Gasgemischen nach der gravimetrischen- und der Partialdruckmethode stehen auf dem DESY-Gelände zur Verfügung [DESB2].

Von den dynamisch volumetrischen Methoden ist trotz geringerer Wiederholgenauigkeit, der Massenflußregler zu favorisieren. Dieser wird von der Industrie preiswert als komplettes, geeichtes Regelgerät mit extrem kleinen Abmessungen angeboten [MAFLR]. Dieses Verfahren erscheint besonders attraktiv wenn man bedenkt, daß für alle H1-Kammern nur wenige Reinstgase als Ausgangsprodukt für die unterschiedlichen Gemische benötigt werden.

Alle vorgenannten Methoden sind nicht geeignet, um wirtschaftlich Gasgemische mit Wasser- oder Alkoholdampfanteilen herzustellen. Wegen des geringen Dampfdruckes kondensieren diese Anteile schon unter dem Einfluß von geringem Überdruck. Daher werden diese Stoffe mit Hilfe der Sättigungsmethode zum Vorgemisch addiert.

Aus ökonomischen und platztechnischen Gründen ist es folglich nicht sinnvoll, Anlagen zur kompletten Mischung aller H1-Gase vor Ort zu planen. Daher sind in den Gasversorgungsanlagen für die inneren Drahtkammern des H1-Experimentes nur Teilbereiche zur Herstellung von Gasmischungen abzudecken. Nachfolgend werden behandelt: Versuche mit Massenflußmessern, Methoden zur Mischung in den geschlossenen Kreisläufen, die Anwendung der Sättigungsmethode zur Addition von Alkohol- und Wasserdampf und die Erfahrungen mit den verwendeten Vorgemischen.

5.2 Massenflußmesser und -regler

Für Massenflußmesser und -regler gibt es zwei wesentliche Einsatzbereiche innerhalb von Gasversorgungsanlagen für Drahtkammern. Sie dienen sowohl der ökonomischen Herstellung der Gasgemische als auch der sicherheitsrelevanten Bilanzierung des Gasein- und des Gasausflusses. Die Vorteile gegenüber den früher verwendeten Schwebekörperflußmessern sind die bessere Genauigkeit, Unabhängigkeit von Druck- und Temperatureinflüssen und die Möglichkeit einer automatischen Regelung, Buchführung und Alarmauslösung. So wurden von DESY in Zusammenarbeit mit der Industrie spezielle Massenflußregler für die großvolumigen Myonkammern der HERA-Experimente H1 und ZEUS entwickelt und in großer Stückzahl eingebaut [KES91]. Diese Entwicklung zeichnet sich durch extrem kompakte Modulbauweise, einen sehr niedrigen Differenzdruck über der Meßstrecke von weniger als 5 Pa (= 0,05 mbar), eine Genauigkeit von 1-5% und ein günstiges Preis/Leistungsverhältnis aus.

Die Gasversorgung der kleinen Zentralkammern des H1-Detektors (Gassystem III) sollte auf Wunsch der Kammerbetreiber ebenso mit Massenflußreglern ausgestattet werden. Da zum Zeitpunkt des Baus das oben erwähnte DESY-System noch nicht erhältlich war, wurden Untersuchungen mit kommerziellen Massenflußreglern an der Universität Zürich durchgeführt [BEC90]. Dort erfolgte auch der mechanische Aufbau des Gassystems III mit zunächst 10 baugleichen Massenflußreglern [HIF12] zur Gemischherstellung und 5 Massenflußmessern zur Kontrolle des Gasrückflusses (vergl. Verrohrungsplan Gassystem III, Abb. E13). Die auf eine spezielle Gasart geeichten Geräte haben alle den gleichen

Meßbereich von 1 bis 100 NI¹ pro Stunde. Die Untersuchungen aus Zürich ergaben, daß die Genauigkeit und Linearität innerhalb der vom Hersteller genannten Grenzen von 1% des Endwertes lagen. Beim Wechsel der Gassorte war jedoch eine Neukalibrierung unumgänglich, da die im Handbuch angegebenen Umrechnungswerte zu Abweichungen von bis zu 20% führten. Ebenso wurde ein positiver Offset in den Flußeichungen festgestellt, d.h. die Stellventile sind bei abgeschalteter Versorgungsspannung nicht vollständig geschlossen.

Die Photos (Abb. 5.1 und Abb. 5.3) zeigen das Gassystem III nach Installation der Elektronik in Aachen. Die fünf offenen Kreisläufe sind im Hauptgasschrank (Bildmitte) übereinander angeordnet. In der Vorderansicht sind jeweils links die Schwebekörperflußmesser der Gaseinlässe zu erkennen. Von hinten (Abb. 5.3) erkennt man rechts die zehn Massenflußregler und weiter links die Massenflußmesser für das aus der Kammer zurückfließende Gas.

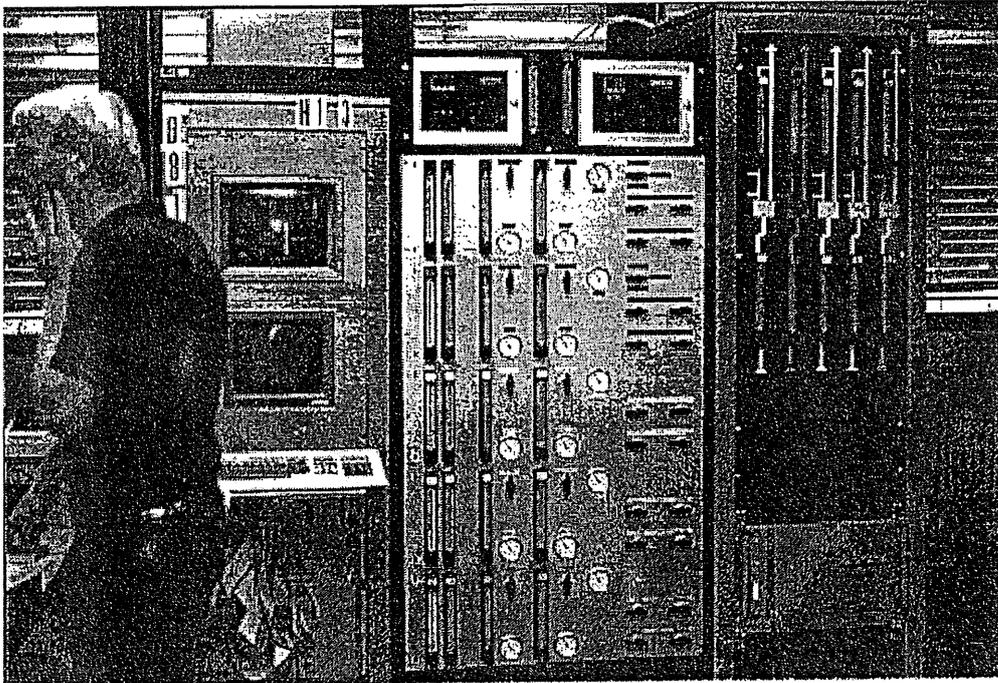


Abb. 5.1: Vorderansicht von Gassystem III, die Schränke von links: Elektronik, Hauptgasschrank (Cir.1 bis Cir.5), Trailer (Photo H. Gräßler)

Anschließend wurde in Aachen untersucht, ob die Herstellung der Gasmische mit diesen Massenflußmessern kompatibel zur Kammerdruckregelung durch die Magnetventile ist. Hierzu wird ein Ausschnitt aus dem Verrohrungsplan eines Kreislaufes X betrachtet (Abb. 5.2). Das Ventil SVX-1 ist außer im Alarmzustand ständig geöffnet, während SVX-2 und SVX-3 der Kammerdruckregulierung zugeordnet sind. Es wurden zwei Möglichkeiten untersucht. Die parallelen Massenflußmesser FMX-3, FMX-4 bleiben entweder unabhängig von der Stellung der beiden Magnetventile SVX-1, SVX-2 permanent offen oder sie werden im Gleichtakt mit dem Magnetventil SVX-2 geschaltet. Die erste Möglichkeit entfiel, da trotz geschlossenem Magnetventil die Flußmesser durch Öffnen ihres ei-

1. 1 NI = 1 bar · 1 Liter; "Normalliter" technische Einheit zur Quantifizierung von Gasmengen

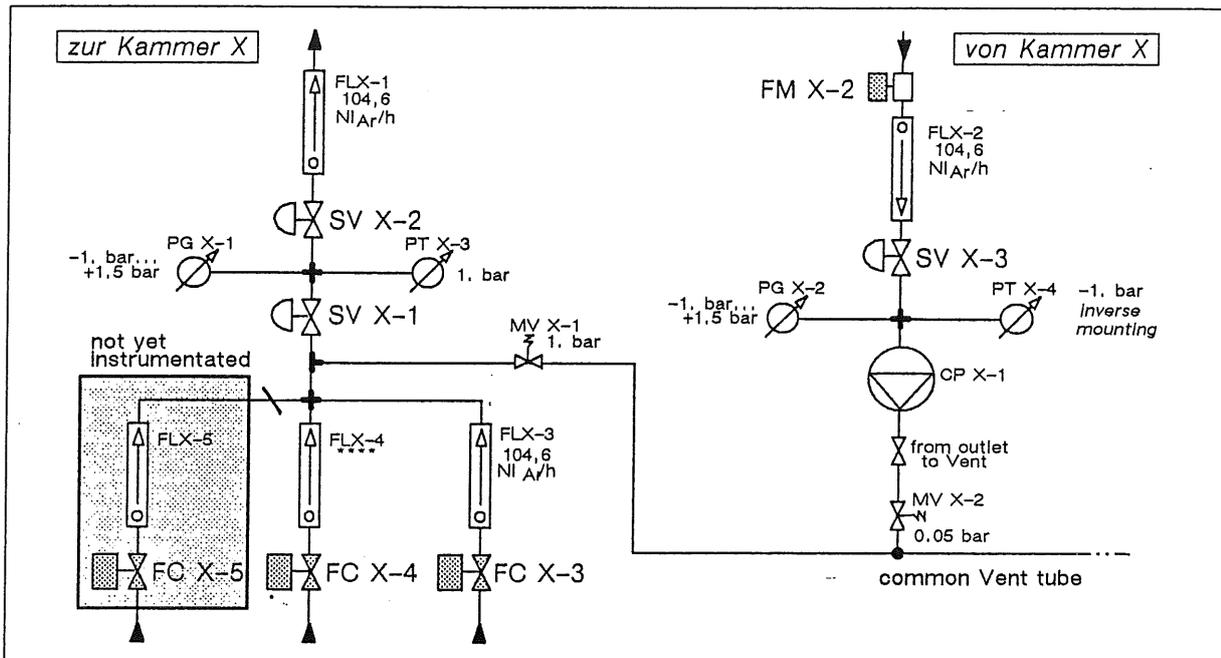


Abb. 5.2: Verschaltung von Massenflußreglern, -messer und Magnetventilen (Gas. III)

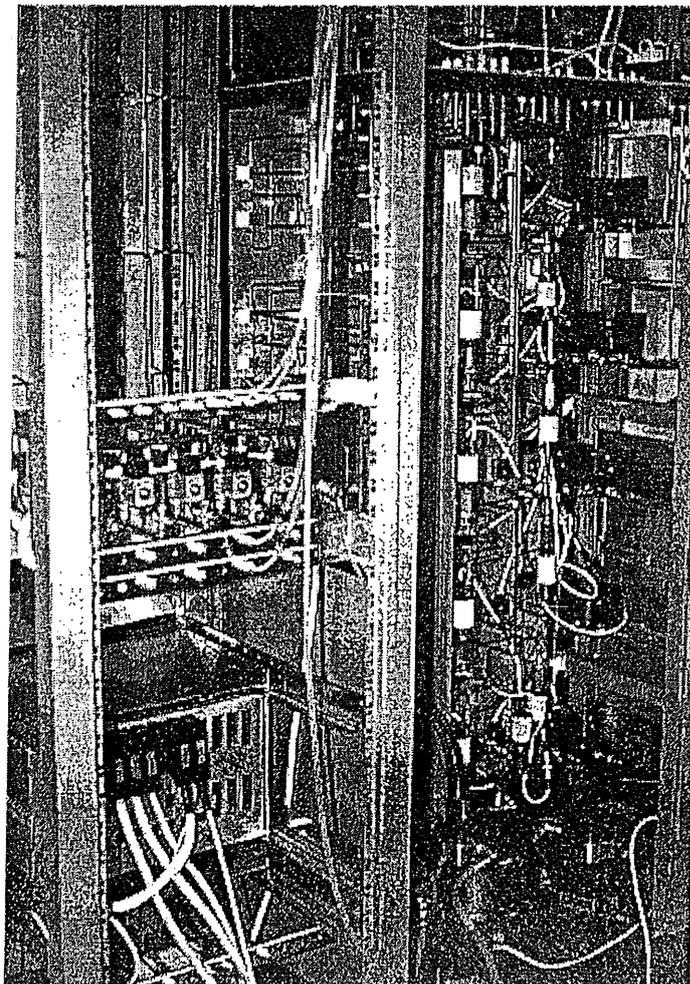


Abb. 5.3: Rückansicht von Gassystem III (Photo H. Gräßler)

genen Stellventils versuchten, den Sollfluß wiederherzustellen. Dabei gelangte solange Gas der Komponente mit dem höheren Vordruck entgegen der vorgesehenen Flußrichtung in die Zuleitung der anderen Komponente, bis sich der Vordruck ausgeglichen hatte. Dieses führte zu einer Verschiebung der Gaskonzentration beim Wiederöffnen des Magnetventils. Die zweite Variante funktionierte ebenfalls nicht, da die Flußmesser sehr unterschiedliche Regelverhalten zeigten. Bei zweien wurde nach dem Einschalten eine Zeit von 1 bis 2 Sekunden gemessen bis der Nominalfluß erreicht wurde, während die übrigen Flußmesser bis zu 80 Sekunden dafür benötigten. Hinzu kommt, daß der Fluß dabei nicht linear anstieg, sondern sich langsam auf den Sollwert einpendelte. Beim Parallelbetrieb störten sich die Regelungen gegenseitig, was zu noch längeren Einstellphasen führte in denen die Mischung nicht stabil war. Um die Massenflußmesser zur Gemischherstellung einzusetzen, wäre folglich entweder das Regelverhalten der Flußmesser zu ändern oder die Kammerdruckregelung dahin gehend zu modifizieren, daß die Flußmesser im festen Teilverhältnis ständig geöffnet bleiben und nach Maßgabe des Kammerdrucks nur noch das Auslaßventil SVX-3 geschaltet wird. Da das Gassystem zu diesem Zeitpunkt dringend in Hamburg erwartet wurde, fehlte die notwendige Zeit, um Modifikationen einzubauen und anschließend zu testen. Es wurde beschlossen, daß in der Anfangsphase zunächst dieselbe Druckregelung wie in den anderen beiden Gassystemen beibehalten werden soll und extern hergestellte Gasgemische verwendet werden. Die Mechanik sowie die elektronische Hard- und Software wurden jedoch schon zur Ergänzung weiterer Massenflußregler für die Gemischherstellung ausgelegt.

Zur Vermeidung größerer Gaslecks dient pro Kreislauf je ein Massenflußregler als Einlaßflußbegrenzer für das Gasgemisch und der zweite zum Anschluß des Spülgases. Im Verlauf der Testphasen zeigte sich, daß der Gasverbrauch der Kammern mit 4,2 bis 12 l/h erheblich geringer als der mit 100 l/h eingeplante Verbrauch war, so daß dieser Bedarf weiterhin wirtschaftlich durch in Druckflaschen abgefüllte Fertiggemische [DESB2] gedeckt werden kann. Die Meßwerte der Eingangs- und Ausgangsflußmesser werden zur externen Flußbilanzierung ausgelesen. Da alle Kammern relativ zum Luftdruck geregelt werden, müssen in der Bilanz der Absolutdruck und die in der Kammer herrschende Temperatur berücksichtigt werden. Sonst würde z.B. bei fallendem Luftdruck und/oder steigender Temperatur ein scheinbares Leck detektiert.

5.3 Mischen in geschlossenen Kreisläufen

Zur Herstellung der Gasgemische für die geschlossenen Kreisläufe sind im wesentlichen drei Methoden zu diskutieren. Die Ausgangssituation sei dabei immer dieselbe, d.h. der komplette Kreislauf und die Kammer(n) sind mit Edelgas gut gespült.

Die triviale Möglichkeit besteht nun darin, die Kammern mit Fertiggemisch zu spülen und danach in den geschlossenen Betrieb umzuschalten. Die Genauigkeit des Mischungsverhältnisses ist hierbei von der externen Herstellung abhängig.

Bei der zweiten Methode (Abb. 5.4) werden über die Schwebekörperdurchflußmesser *FLO-1* bis *FLO-4* [PORF1] bis zu drei Reingaskomponenten parallel eingefüllt. Die Genauigkeit liegt dabei im Bereich von 10% und kann durch Erfahrung des Operators bei Reproduktion verbessert werden. Nach dem Schließen des Kreislaufes wird eine Homogenisierungszeit von mehreren Stunden abgewartet und anschließend das Gasgemisch ana-

lysiert. Ausgehend vom Analyseergebnis sind dann durch Nachmischen die Konzentrationen zu korrigieren, bis der Nominalwert erreicht ist.

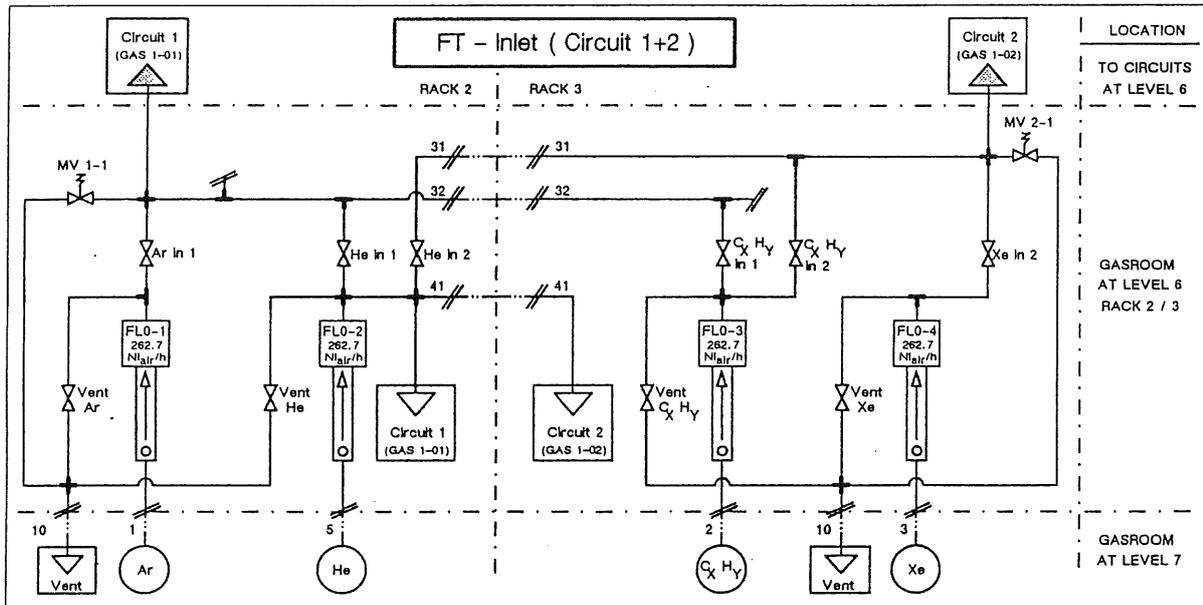


Abb. 5.4: Verrohrungsplan des Einlaßteils für geschlossenen Kreisläufe (s. Abb. E3)

Die dritte Möglichkeit zur Herstellung der Gasmischung ist die manometrische Methode. Hierzu steht in jedem geschlossenen Kreislauf ein Puffervolumen mit 80l Inhalt mit einem angeschlossenen Reaktivdruckmesser PTX-3 zur Verfügung (Abb. 5.5). Das Puffervolumen wird unabhängig vom Kreislauf zuerst gründlich gespült und danach mindestens 30 Minuten lang mit einer zweistufigen Drehschieberpumpe [EDWE2] evakuiert (Min. Enddruck der Pumpe ca. 1 Pa = 10^{-2} mbar). Dann wird nach Anzeige des Manometers eine

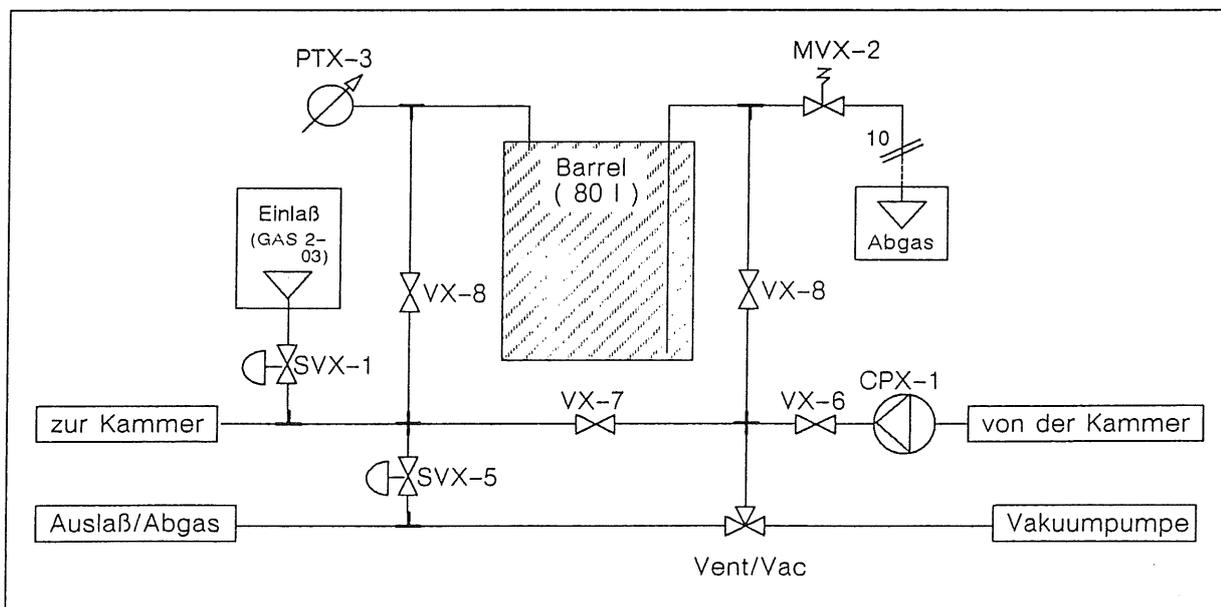


Abb. 5.5: Ausschnitt aus dem Verrohrungsplan eines geschlossenen Kreislaufes

bestimmte Menge Reingas eingefüllt oder ein Gasgemisch nach dem Partialdruck der Einzelkomponenten hergestellt. Aus Sicherheitsgründen ist der maximale Behälterdruck durch Softwarelimits der elektrischen Druckdose und einem zusätzlichen mechanischen Überdruckventil MVX-2 [NUPCA] auf etwa 2 bar absolut begrenzt. Damit ist die bei einem Vorgang herzustellende Gasmenge auf ungefähr 160 NI limitiert. Die Genauigkeit des Druckmessers beträgt 600 Pa (= 6 mbar) und die Reproduzierbarkeit ist bei gleichen äußeren Bedingungen 250 Pa [VDW01]. Damit läßt sich bei einer Mischung idealer Gase im Volumenverhältnis 50/50 eine Wiederholgenauigkeit von 0,25%–rel. erreichen.

Für den praktischen Betrieb ist nicht allein die Grundgenauigkeit des Mischungsverhältnisses der ausschlaggebende Faktor. Komponentenselektive De- bzw. Adsorption in Reiniger- und Additionseinheiten sowie unvermeidliche Lecks und Diffusion in/aus dem kompletten System verschieben das Konzentrationsverhältnis des hergestellten Gemischs (vergl. 7. Kapitel). Deshalb ist in festen zeitlichen Abständen eine Gasanalyse notwendig, um diese Abweichungen zu korrigieren. Wegen ihrer hohen Genauigkeit ist zur Korrektur die manometrische Methode am besten geeignet.

Am Beispiel des Standard-Gasgemisches Argon/Ethan im Molenverhältnis 50/50 werden die Mischungsmethoden unter praktischen Gesichtspunkten wie Zeitaufwand und Gasverlust verglichen. Die Kammer wird zuerst mit reinem Argon gespült, da ein Evakuieren wegen ihrer geringen mechanischen Belastbarkeit ausgeschlossen ist. Argon bietet sich in den meisten Fällen an, da es preiswert zur Verfügung steht (LAr-Tank), als Inertgas hohe Reinigungswirkung besitzt und eine Grundkomponente des Kammergases ist. Zur Vereinfachung wird angenommen, daß sich die Gase in einer 1.000 NI Kammer durch Diffusion und Konvektion ideal mischen nach:

$$dN/dt = -k \cdot N \Leftrightarrow N(t) = N(t_0) \cdot e^{-k(t-t_0)} \quad \text{mit} \quad k = \frac{p_{\text{Leitung}} \cdot dV/dt}{p_{\text{Kammer}} \cdot V_{\text{Kammer}}} \quad (5.1)$$

N steht für Anzahl der 'alten' Gasmoleküle und die Konstante k ist der Quotient aus dem Normalfluß durch die Kammer und dem Normalvolumen der Kammer. Der komplette Exponent gibt die Anzahl der Volumenaustausche an.

Zur kompletten Neuversorgung der Kammern mit der manometrischen Methode ist die Anlage nicht ausgelegt. Bei sorgfältiger Vorgehensweise dauert es mindestens zwei Stunden, um maximal 160 NI Gemisch im Puffervolumen herzustellen. Davon sind allerdings nur etwa 75 NI nutzbar, da zum Füllen der Kammer ein gewisser Vordruck notwendig ist. Wird die Kammer mit 6.000 l Premix gespült (6 Volumenaustausche), so beträgt die Endkonzentration in der Kammer 99,75% des 'neuen' Gases; das entspricht einer Ethankonzentration von:

$$c_{\text{Ethan}} = 50,0 \text{ Vol\%} \cdot (1 - e^{-6}) = 49,88 \text{ Vol\%}$$

Wird aber statt Premix reines Ethan in die Kammer eingefüllt, so sind zum Erreichen derselben Ethankonzentration nur ca. 0,7 Kammervolumen (= 700 l) notwendig:

$$c_{\text{Ethan}} = 49,88 \text{ Vol\%} = 100 \text{ Vol\%} \cdot (1 - e^{-x}) \Rightarrow x = 0,696 \approx 0,7$$

Im ersten Fall beträgt der Gasverlust 5.000 l Premix (=2.500l Ethan) und im zweiten Fall gelangen 200 l Ethan in die Abluft. Bei der ersten Methode ist die Genauigkeit der Flußmessung nicht kritisch. Um sicherzustellen, daß die Gasmischung mit den richtigen Komponenten innerhalb der gewünschten Toleranz hergestellt wurde, sollte sie vor dem

Einsatz analysiert werden. Bei der zweiten Methode wird über die eingefüllte Gasmenge das Konzentrationsverhältnis definiert. Legt man für beide Varianten denselben typischen Fluß von 100 NI/h zugrunde, so dauert der erste Vorgang 60 und der zweite 7 Stunden. Zu den 7 Stunden muß allerdings noch mindestens ein weiterer Tag addiert werden, an dem das Gasgemisch im geschlossenen Kreislauf zur Homogenisierung umgepumpt wird. Diese Zeiten lassen sich in etwa halbieren, wenn statt des typ. Flusses mit maximal möglichem Fluß gearbeitet wird. Im Realfall ist die Durchmischung jedoch deutlich schlechter als oben angenommen. Gemäß den Erfahrungen mit den H1-Kammern muß die Konstante k mit einem Faktor von etwa 0,5 multipliziert werden, was einer Verdopplung der Homogenisierungszeit entspricht. Weiterhin müssen neben dem Kammervolumen noch die Zuleitungen und die Volumina des Kreislaufes gefüllt werden.

Die Herstellung einer dreikomponentigen Mischung wird am Beispiel von Xenon/Ethan/Helium (20/40/40) für die Radialkammern erläutert. Das insgesamt zu füllende Volumen setzt sich zusammen aus 700 NI für die Radialkammern und weiteren 150 NI für den Rest des Kreislaufes. Die Spülung der gesamten Anlage erfolgt zweckmäßigerweise mit Helium. Danach wird analog dem vorigen Beispiel ein Helium/Ethan (50/50) Gemisch hergestellt. Da Xenon sehr teuer ist, muß beim weiteren Vorgehen der geringst mögliche Gasverlust angepeilt werden. Zur kompletten Füllung werden 170 l Xenon benötigt. Diese Menge kann beinahe vollständig im Puffervolumen des Gassystems bereitgestellt werden. Hierzu wird dieses Volumen evakuiert und bis zum maximal möglichen Druck mit reinem Xenon gefüllt. Dann wird solange mit offenem Auslaß reines Xenon aus dem Puffervolumen in Richtung der Kammern gespült, bis die noch fehlende Menge manometrisch dem Behälter zugemischt werden kann. Nachdem der Systemvordruck wieder auf den Nominalwert abgesunken ist, kann der Kreislauf zur Homogenisierung wieder geschlossen werden. Weil Xenon sich außerordentlich träge mit anderen Gasen vermischt, ist die Verlustmenge äußerst gering. Ein weiterer Grund für eine nur langsame Vermischung der Komponenten, ist durch die Einteilung des Volumens der Radialkammern gegeben. Um eine optimale Durchspülung aller 48 Segmente zu gewährleisten, versorgt der zweigeteilte Gasstrom mäanderförmig je 24 'Kuchensegmente' nacheinander. Die Gasverbindung zwischen zwei Teilvolumina besteht aus einem $4 \times 4 \text{ mm}^2$ großen Loch am inneren oder äußeren Radius. Aus den genannten Gründen ist der Zeitraum bis die drei Komponenten vollständig durchmischt sind, erheblich länger als bei den anderen Kammern. Dieser Sachverhalt kann durch Messung des Xenongehaltes im Auslaß der Kammer bestätigt werden. Alternativ dazu können die Kammern auch einzeln mit Xenon gefüllt werden. Am Verteilerschrank auf dem Trailer werden manuell zwei Kammern in Kreislauf 4 (Spare) geschaltet oder einfach deren Einlaßflußmesser geschlossen. Durch Mittelung des statistischen Fehlers dreier Einzelmessungen, läßt sich eine höhere Genauigkeit erreichen, was andererseits einen höheren Zeitaufwand bedeutet.

An dieser Stelle sei noch einmal betont, daß wegen des nur grob abschätzbaren Sorptionsverhaltens von Reinigern und Additiven, die Genauigkeit der verschiedenen Methoden bei der Neuanmischung eine untergeordnete Rolle spielt. In jedem Fall ist nach einer Stabilisierungsphase eine Gemischkorrektur mit der manometrischen Methode erforderlich, so daß die resultierende Genauigkeit nur noch von der Analysengenauigkeit abhängt.

5.4 Zumischung der Additive

Um Alterungseffekte der Kammern zu vermeiden, wird Alkohol-, Wasserdampf oder Freon®12 in kleiner Konzentration (0,1 bis 1 Vol%) den Kammergasen zugemischt. Die Addition des Freons erfolgt bei der Herstellung des Vorgemischtes auf dem DESY-Gelände. Freon 12 (CCl_2F_2) hat bei Umgebungstemperatur (20°C) einen Dampfdruck von 5,78 bar. Wegen des kleinen benötigten Anteils von 0,2 Vol% kann Freon als erste Komponente nach der Partialdruckmethode eingefüllt werden, ohne daß die Gefahr einer Kondensation besteht. Die Alkohole (Ethanol, 2-Propanol) sowie Wasser liegen bei Normalbedingungen flüssig vor und werden daher kontinuierlich mit der Sättigungsmethode direkt im Gaskreislauf addiert.

Die Grundlage zur Planung einer Anlage hierzu ist die Dampfdruckkurve des Additivs, die den Gasdruck als Funktion der Temperatur T beschreibt. Für einen ausgewählten Temperaturbereich ist diese Funktion für die beim H1-Experiment benötigten Dämpfe dargestellt (Abb. 5.6).

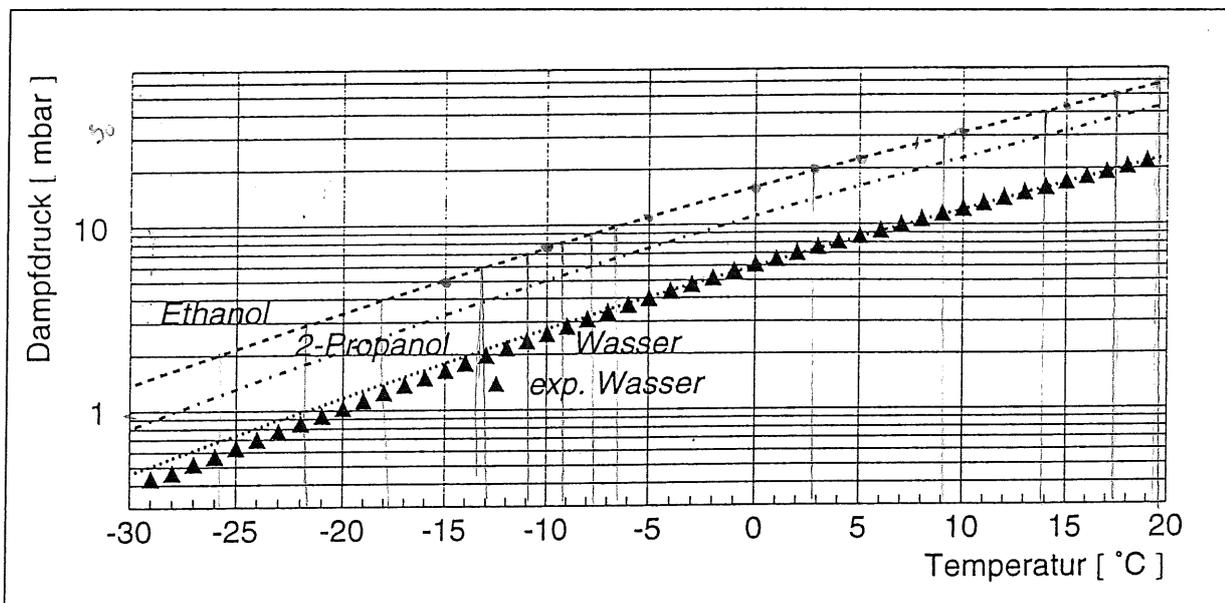


Abb. 5.6: nach Antoine berechnete Dampfdruckkurven [RPS77] sowie experimentelle Daten für Wasserdampf

Wird nun ein Gas mit einem Gesamtdruck p_{ges} von 1.000 bis 1.300 mbar mit dem Dampfdruck p_d einer dieser Komponenten gesättigt, so lassen sich in dem ausgewählten Temperaturintervall die erforderlichen Konzentrationen von ca. 0,1 bis 1 Vol% erreichen. Bei diesem Gesamtdruck sind Realgaskorrekturen zu vernachlässigen, wodurch das Partialdruckverhältnis gleich dem Volumenverhältnis wird:

$$c_{Additiv} = \frac{p_d(T)}{p_{ges.}} \cdot 100 \text{ Vol\%} \quad (5.2)$$

Zur Auswertung der Temperatur- und Druckmeßwerte sowie zur Eichung der Analysegeräte ist es sinnvoll eine numerische Berechnung des Dampfdruckes $p_d(T)$ zu verwenden.

Diese Funktion läßt sich aus einer Vielzahl von Zustandsgleichungen gewinnen. Die bekannteste ist die Clausius–Clapeyron–Gleichung. In der Praxis hat sich jedoch eine von Antoine modifizierte Gleichung durchgesetzt:

$$\ln p_d = A - \frac{B}{T+C} \quad \text{mit: } \begin{array}{l} p_d \text{ in mmHg} \\ T \text{ in Kelvin} \\ A, B, C = \text{Antoine - Konstanten} \end{array} \quad (5.3)$$

Diese ist bis auf die empirisch gefundene Konstante C identisch mit der integrierten Clausius–Clapeyron–Gleichung. Die relative Abweichung der Resultate von gemessenen Werten ist für Dampfdrücke von 15 bis 2.000 mbar meist kleiner als 1%. Diese Genauigkeit wird von keiner anderen Gleichung erreicht [RPS77]. Die in Abb. 5.6 dargestellten Kurven sind mit Gleichung 5.4 und den Antoine–Konstanten aus Tab. 5.2 berechnet. Der Dampfdruck p_d ist für den praktischen Gebrauch in die Einheit *mbar* umgerechnet.

<p>(5.4) Antoine–Gleichung:</p> $\frac{p_d}{[\text{mbar}]} = \frac{1013,25}{760} \exp\left(A - \frac{B}{T+C}\right)$		H ₂ O	Ethanol	2–Propanol
	A	18,3036	18,9119	18,6929
	B	3816,44	3803,98	3640,20
	C	–46,13	–41,68	–53,54

Tab. 5.2: Antoine–Konstanten und zugeschnittene Größengleichung zur Berechnung der Dampfdruckkurven

Für Wasserdampf sind zusätzlich experimentell bestimmte Werte aufgetragen. Man erkennt deutlich die Übereinstimmung für große Dampfdrücke und das überschätzende Verhalten der theoretischen Kurve beim Verlassen des Gültigkeitsbereiches. Bei einer Temperatur von 0°C beträgt der relative Fehler $(p_{theo.} - p_{exp.})/p_{exp.}$ des Wasserdampfdruckes noch 3% und ist bei –25°C schon auf 16,7% angestiegen. Für die Drahtkammern des Experimentes spielt jedoch die absolute Genauigkeit keine so entscheidende Rolle, da der Additivanteil am Gesamtgasgemisch relativ gering ist. Geht man zum Beispiel von einer gewünschten Alkoholkonzentration von 1 Vol% aus und läßt eine relative Schwankung von 10% zu, so ändert sich der Anteil am Gesamtgemisch nur um 0,1 Vol%. Daher sollte sich eine Variation des Additivanteils im Vergleich mit den Toleranzen der übrigen Gaskomponenten nur gering in den Kammereigenschaften bemerkbar machen. Wichtiger sind hier die Reproduzierbarkeit und die Langzeitstabilität der Konzentration. Deshalb ist es berechtigt, zur Abschätzung des Fehlers der Konzentration durch Druck– und Temperaturänderungen die Antoine–Gleichung (5.3 oder 5.4) als obere Grenze in 5.2 einzusetzen.

$$C_{Additiv} = \frac{e^{\left(A - \frac{B}{T+C}\right)}}{p_{ges.}} \cdot 100 \text{ Vol\%} \quad (5.5)$$

Der durch Druckschwankungen Δp verursachte relative Fehler der Konzentration ist triviale Weise exakt proportional der relativen Konzentrationsabweichung:

$$\text{rel. Fehler durch } p_{ges.}: \quad \frac{\Delta c_A}{c_A} = \frac{1}{c_A} \left| \frac{\partial c_A}{\partial p_{ges.}} \Delta p_{ges.} \right| = \frac{\Delta p_{ges.}}{p_{ges.}} \quad (5.6)$$

Wegen der Verknüpfung der Temperatur mit den Antoine-Konstanten in der Exponentialfunktion, ist der durch Temperaturschwankungen bedingte Fehler gasartspezifisch:

$$\text{rel. Fehler durch } T: \quad \frac{\Delta c_A}{c_A} = \frac{1}{c_A} \left| \frac{\partial c_A}{\partial T} \Delta T \right| = \frac{B}{(T+C)^2} \Delta T \quad (5.7)$$

Zum Aufbau einer Anlage zur Addition nach der Sättigungsmethode war nach Abb. 5.6 eine Kühlmöglichkeit zu schaffen, um den für die H1-Kammern erforderlichen Konzentrationsbereich abzudecken. Alternativ dazu hätte man bei Umgebungstemperatur den Gesamtdruck auf einem hohem Niveau regeln können. Aus Sicherheitsgründen mußte diese Möglichkeit verworfen werden. Die dritte Möglichkeit besteht darin, bei fester Temperatur nur einen Teilfluß des Kammergases über das Additiv zu leiten (s.u.).

In einem gekühlt untergebrachten Behälter mit festem/flüssigem Additiv sollte ein ausreichendes Volumen vorhanden sein, damit das einströmende Gasgemisch vollständig mit dem Dampfdruck gesättigt wird. Wegen der endlichen Verdampfungsgeschwindigkeit darf die Flußrate beim Überströmen des Additivs nicht beliebig hoch sein. Temperatur und Gesamtdruck sollten kontinuierlich erfaßt und nach Möglichkeit konstant gehalten werden (Gl. 5.6 und 5.7), da sie nach Maßgabe der Dampfdruckkurve die Konzentration definieren.

Um die absolute Konzentration genau zu bestimmen, sollten experimentelle Daten anstelle der Antoine-Gleichung (5.4) verwendet werden. Die Dampfdruckkurve beschreibt jedoch nur den Gleichgewichtszustand zwischen koexistenter Dampf- und Flüssigphase des reinen Additivs. Zusätzlich müßten die dampfdruckerhöhenden / -erniedrigenden Einflüsse der restlichen Gaskomponenten berücksichtigt werden.

Seit November 1989 ist im Kreislauf 1 in Gassystem I eine CERN-Kühleinheit installiert, welche die Addition von etwa 1 Vol% Ethanol zum Argon/Propan-Gemisch (90/10) ermöglicht. Diese Anlage besteht aus einem Haushaltskühlschrank mit nach außen verlegter Temperaturreglung. In dessen inertgasgespültem Innenraum ist ein Edelstahlbehälter zur Aufnahme von 1,5 l Alkohol eingebaut. Der Behälter hat neben einem Schauglas und einer Entleerungsleitung drei Gasanschlüsse. Zwei davon enden direkt oben am Deckel, während der dritte in das Flüssigkeitsvolumen eintaucht und in einer Sinterplatte (Diffusor) endet. Durch diese Leitung soll das Vorgemisch in kleinen Gasblasen durch die Flüssigkeit perlen und sich proportional zur Temperatur vollständig mit Alkoholdampf sättigen. Beim Zerplatzen der Gasblasen an der Flüssigkeitsoberfläche entstehen aber leider auch unerwünschte Aerosole. Das sind kleinste Flüssigkeitströpfchen, die sich, je kleiner umso weiter, im austretenden Gasstrom mitbewegen. Daher ist in einer Empfehlung der Isonorm [ISO04] ein zweiter gekühlter Behälter vorzusehen, in dem der Flüssiganteil über geeignete Kondensatoren ausgefiltert werden kann. Da in der CERN-Einheit kein solches Gefäß vorhanden war, wurde sicherheitshalber der Diffusor nicht eingesetzt. Durch Benutzen der beiden anderen Leitungen wurde versucht, ob eine Sättigung schon bei einfachem

Überströmen des Dampfraumes erreicht werden kann. Das Verfahren funktionierte bei einem typ. Fluß von ca. 1 NI/min [KEM90] und wurde bis 1992 eingesetzt.

Die ersten Ergebnisse, die im Juni 1990 im RAL mit der Anlage erreicht wurden, werden vorgestellt. Die Temperatur im Ethanolbehälter wurde auf 0°C eingeregelt, was nach (5.4) einem Dampfdruck von 15,9 mbar entspricht. Der Gesamtdruck ist identisch mit dem Druck des Puffervolumens (vergl. Abb. 5.5) und wurde manuell auf $p_{ges.} = 1.400 \text{ mbar} \pm 200 \text{ mbar}$ eingestellt. Bezogen auf den mittleren Gesamtdruck sollte sich nach Gleichung 5.2 eine Ethanolkonzentration von 1,14 Vol% einstellen. Zur quantitativen Auswertung wurden Behältertemperatur T und -druck $p_{ges.}$ kontinuierlich vom Gassystem ausgelesen. Nach Gl. 5.6 erwartet man eine druckbedingte relative Konzentrationsänderung von 14% im austretenden Gas. Die gemessenen Temperaturschwankungen des Kühlschranks betragen max. $\pm 2^\circ\text{C}$, was nach Gl. 5.7 einen zusätzlichen Fehler von 14% ergibt. Hauptursache für die Abweichung waren die periodischen Schwankungen der Hallentemperatur im Tag-Nacht-Rhythmus. Zur Kontrolle wurde das Gas mittels Infrarotabsorptionsmeßgerät (NDIR) und Gaschromatograph [VAR37] regelmäßig am Ausgang der Kammern analysiert ([KEM90] und 8. Kapitel). Die Analyseergebnisse zeigten innerhalb eines Monats jedoch nur eine maximale Schwankung des Alkoholgehaltes von knapp 10%. Der Grund liegt darin, daß die Druck- und Temperaturabweichungen vom Mittelwert zu kurze Periodendauern hatten, um bei dem kleinen Fluß von 1 NI/min die angeschlossenen Volumina ($>1.000 \text{ NI}$) komplett mit der 'falschen' Konzentration anzureichern (vergl. Gl. 5.1). Im weiteren Verlauf der Testphase wurde ein negativer Langzeiteffekt beobachtet. Wegen Vereisung des Kühlschranks stieg stetig die Solltemperatur des Additivs und damit die Alkoholkonzentration. In der Zeit des Abtauens bis zum Wiedererreichen der Solltemperatur mußte die Zumischanlage einige Tage vom Kreislauf getrennt werden.

Im Verlauf der stetig anwachsenden Luminosität des Speicherrings HERA wünschten weitere Kammerbetreiber, dem Kammergas Additive zuzusetzen. Unter Mitwirkung eines Kollegen aus dem RAL [FLO91] sind diverse Konzepte zum Aufbau einer solchen Anlage erstellt worden. Neben einer Temperaturkonstanz von besser als 1°C , sollte die neue Sechsfachanlage platzsparend, preiswert, langlebig und sicher sein. Um die Anlage kompakter als die CERN-Einheit zu gestalten, waren alle Behälter zur Aufnahme des flüssigen oder festen Additivs in einem Kältereservoir mit gemeinsamer Temperaturisolierung unterzubringen.

Zur Herstellung der unterschiedlichen Konzentrationen werden hier die zwei oben erwähnten Möglichkeiten diskutiert. Bei fester gemeinsamer Kühlschrankschranktemperatur wird ein je nach Bedarf definierter Teilfluß des Kreislaufs über den zugehörigen Behälter mit Additiv geleitet oder die Behälter werden mit je einer separaten Zusatzheizung ausgestattet, mit der eine individuelle und konstante Temperatur eingestellt werden kann.

Vorversuche zur Wasserdampfbeimischung nach der ersten Methode wurden 1991 mit der CJC am Gassystem II durchgeführt. Ein über Schwebekörperflußmesser manuell eingestellter Teilfluß F_1 des Kammergases wurde bei Raumtemperatur durch den Gasraum eines Wasserbehälters geleitet (Abb. 5.7). Der resultierende Wassergehalt wurde am Ausgang der Kammer mit einem Hygrometer [PAN3A] gemessen. Es stellt sich der erwartete exponentialförmige Verlauf der Wasserkonzentration bis zum gewünschten Endwert ein. Der kleine benötigte Teilfluß konnte mit den vorhandenen Schwebekörperflußmessern jedoch nicht verlässlich den sich ändernden Druck- und Temperaturbedingungen

angepaßt werden. Im späteren Betrieb würde durch die Kühlung ein günstigeres Teilverhältnis n erreicht werden, womit sich die Genauigkeit der Flußbestimmung deutlich erhöhen ließe.

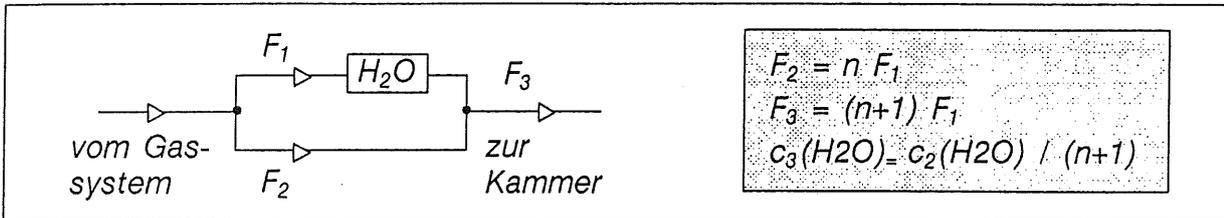


Abb. 5.7: Wasserdampfaddition mit Konzentrationseinstellung durch Flußteilung

Nach diesen Erfahrungen ist für einen automatischen Betrieb eine Flußregelung notwendig, die von einem Temperaturfühler und einem Analysegerät kontinuierlich die aktuellen Istwerte erhält. Der Nachteil dieser Anordnung ist, daß Fehler aus Temperaturmessung, Analysegerät und Massenflußmesser addiert werden müssen und die Beschaffung der Geräte erhebliche Kosten verursacht. Daher wurde die einfachere und preiswertere Möglichkeit realisiert.

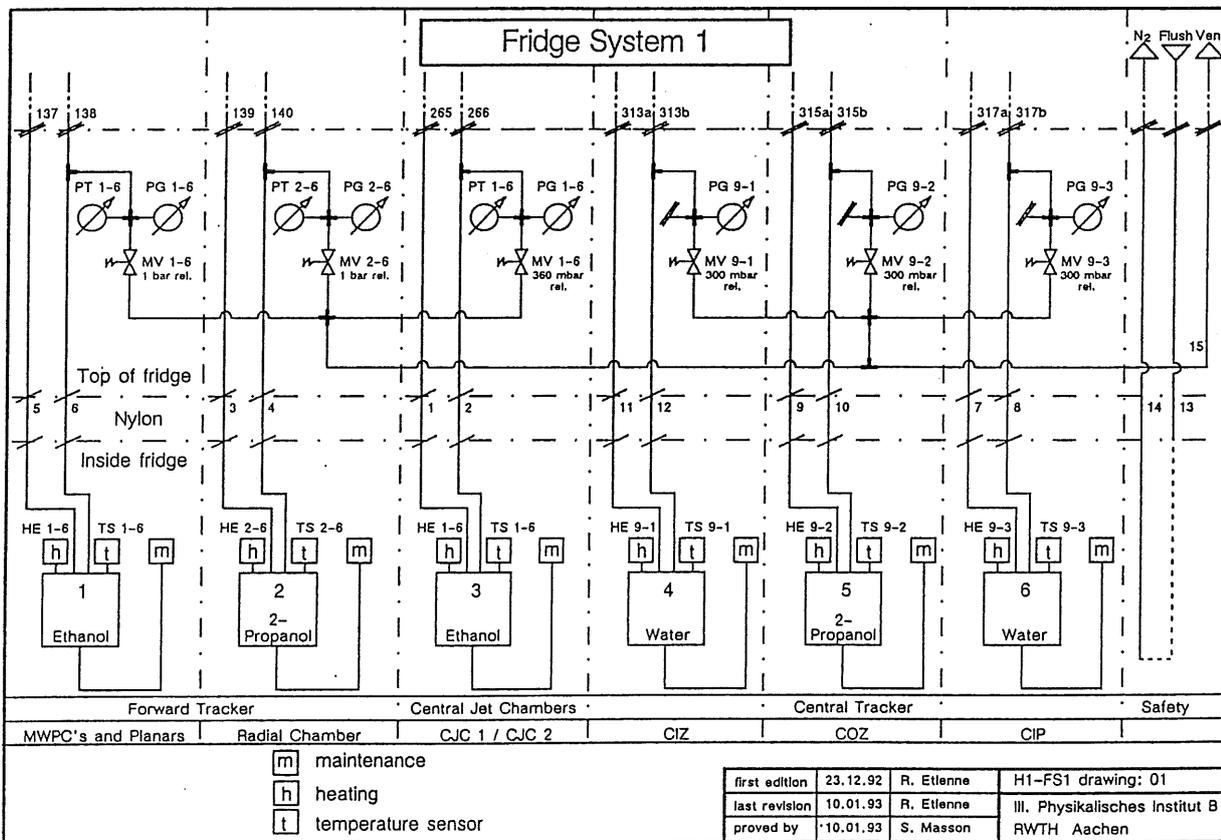


Abb. 5.8: Verrohungsplan der Additiv-Station (aus [ETI93])

Zunächst wurde ein Tiefkühlschrank mit selbsttätiger Enteisung gekauft [LIE20], mit dem sich problemlos Temperaturen bis -28°C erreichen lassen. Mit einer Lebenserwartung

von mehr als 10 Jahren war hierfür ein normales Haushaltsgerät die preiswerteste Lösung. Der Innenraum konnte, dank der zur Kühlung verwendeten Umlufttechnik, leicht zur Aufnahme von sechs hartgelöteten Messingbehältern modifiziert werden. Diese sind am Außenmantel mit Steinwolle thermisch isoliert und mit einer Heizwicklung h (log. Name: *HEX-Y*) ausgestattet (Abb. 5.8, Abb. 5.9).

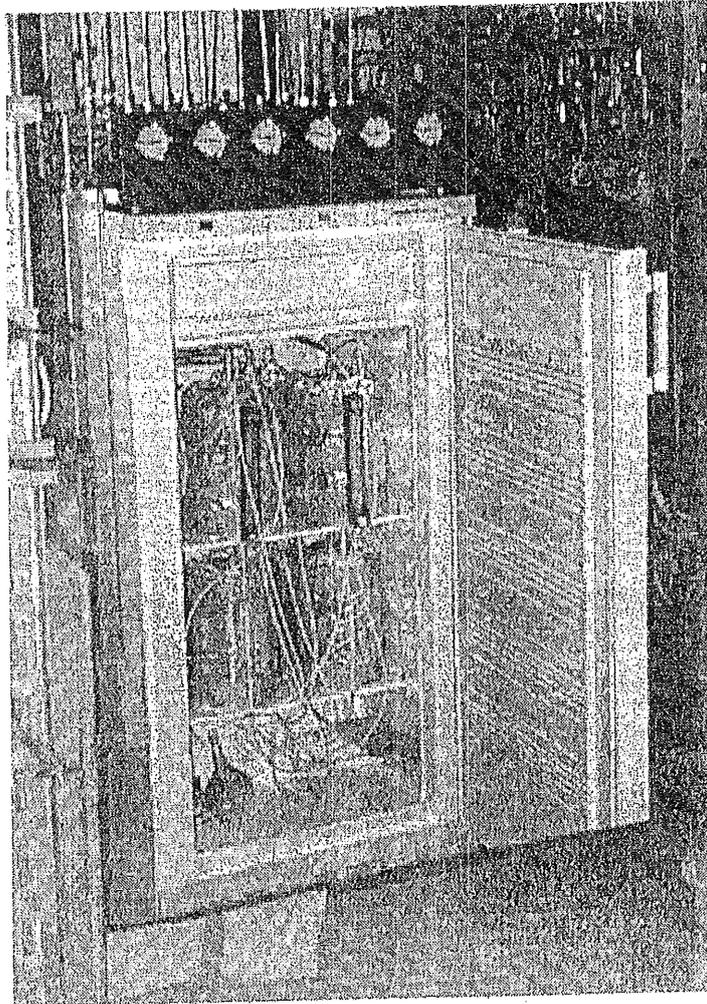


Abb. 5.9: Station zur Beimischung von Alkohol- und Wasserdampf (Photo E. Bock)

Die Boden- und die Deckeloberfläche ermöglichen den thermischen Kontakt mit der Kühlluft. Ein PT100-Temperaturfühler t (*TSX-Y*) ist in einem gasdichten Rohr eingeklebt, welches durch den Deckel bis kurz über den inneren Behälterboden reicht, um die aktuelle Temperatur des festen/flüssigen Additivs zu messen. Der Behälterdeckel enthält zwei weitere Bohrungen zum Anschluß der Leitungen des Gaskreislaufes. An der Vorderseite ist ein Schauglas zur Kontrolle des Füllstandes angebracht. Am Boden befindet sich der Anschluß zum Füllen m . Der Innendruck der Behälter für geschlossene Gaskreisläufe wird mittels elektrischem Differenzdruckmesser *PTX-6* automatisch erfaßt. Der Druck bei den offenen Kreisläufen ist bis auf wenige mbar mit dem Umgebungsluftdruck (*PT6-1*) identisch, da sich die Zumischanlage direkt in der Zuleitung der Kammer befindet. Aus Sicherheitsgründen sind alle Behälter mit mechanischen Druckaufnehmern *PGX-Y* und Rückschlagventilen *MVX-Y* ausgerüstet.

Zur automatischen Regelung werden zuerst die Solltemperatur des Additivs und eine

'Warning'-Schwelle via Terminal eingegeben. Anschließend wird die Regelung mit dem Kommando 'set heating HEX-Y auto' aktiviert. Unterschreitet der Meßwert $TSX-Y$ den Nominalwert $TSX-YN$, so wird die entsprechende Heizung $HEX-Y$ eingeschaltet und bei Erreichen des Nominalwertes wieder ausgeschaltet. Zur Minimalisierung der Temperaturhysterese ist die Heizleistung mit Hilfe eines Dimmers einstellbar. Überschreitet die Temperatur die Warninggrenze: $TSX-Y > TSX-YN + TSX-YW$, so schaltet das Programm des jeweiligen Gassystems den Prozeß der Temperaturregelung aus. Im Alarm- oder Superalarmfall werden ebenfalls die Heizungen automatisch abgeschaltet. Diese neue Anlage wurde in der Runpause 1992/93 im Gasraum 601 des H1-Gebäudes installiert. Nach Inbetriebnahme wurden Untersuchungen zum Sättigungsverhalten mit angeschlossenen Kammern durchgeführt. In Abb. 5.10 ist am Beispiel der MWPCs und der Planaren Driftkammern gezeigt, wie sich durch eine Temperaturerhöhung im Alkoholbehälter die Dampfkonzentration am Ausgang der Kammer zeitlich ändert.

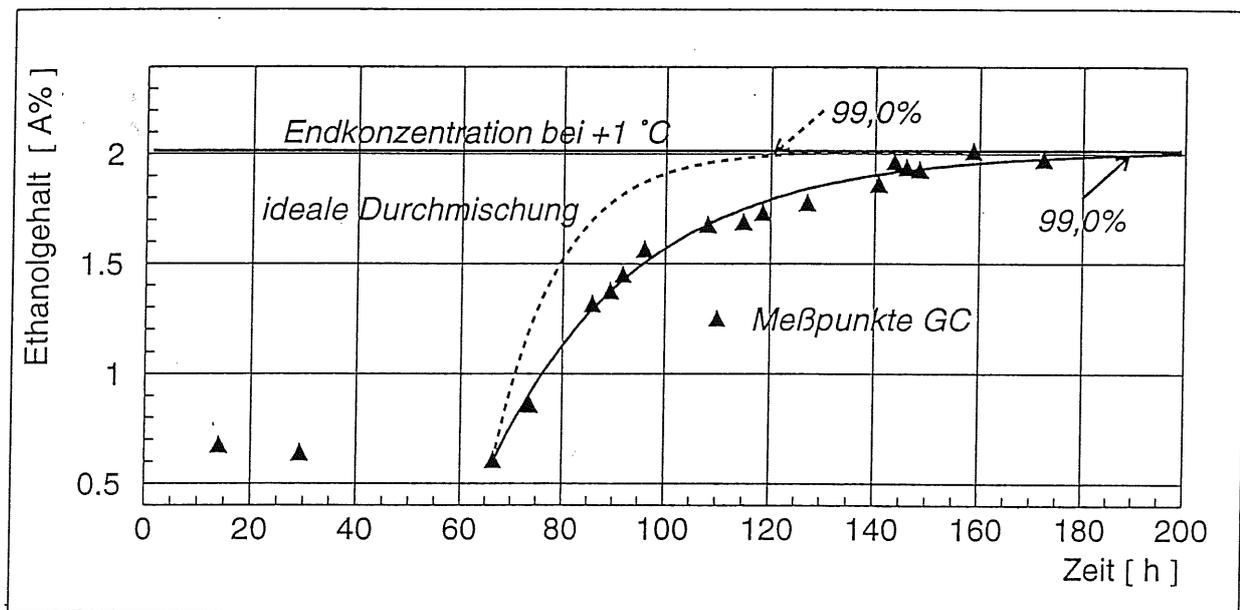


Abb. 5.10: Verhalten der Ethanolkonzentration in den MWPCs und Planaren Driftkammern bei Temperaturerhöhung im Zumischbehälter

Der Ethanolgehalt wurde mit einem Gaschromatographen [CP900] bestimmt. In der Einheit Flächenprozent A% ist hier das direkte Meßergebnis angegeben, welches sich aus der Integration der gemessenen Einzelgaspeaks ergibt. Mit Hilfe von Korrekturfaktoren lassen sich die Flächenprozent in Volumenprozent umwandeln (vergl. 8. Kapitel). Die Symbolgröße entspricht in etwa dem mittleren quadratischen Meßfehler von $\pm 0,04$ A%. Ausgehend von einer Ethanoltemperatur von etwa -17°C wurde nach 66,5 Stunden die Temperatur auf $+1^{\circ}\text{C}$ erhöht. Wegen des guten thermischen Kontaktes zwischen Heizung und Behälter war die 'neue' Temperatur schon nach wenigen Minuten stabil. Der erwartete exponentialförmige Anstieg der Ethanolkonzentration am Ausgang der Kammern ist deutlich in den Meßergebnissen zu erkennen.

Zur quantitativen Auswertung wurde zunächst eine Funktion (5.8) an die Meßpunkte angepaßt. Wie in Formel 5.1 ist hier k der Quotient aus dem Fluß durch die Kammern und deren Normvolumen, c_0 ist die Anfangskonzentration zur Zeit $t = 0$ und c_{∞} ist die Endkon-

zentration für unendliche Zeiten:

$$c_{(Fit)} = c_0 \cdot e^{-kt} + c_\infty \quad \text{mit:} \quad \begin{aligned} c_0 &= (-14,17 \pm 1,197) \text{ A\%} \\ k &= (0,0347 \pm 0,0013) \text{ h}^{-1} \\ c_\infty &= (2,015 \pm 0,019) \text{ A\%} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Bei einem Normvolumen von $p_{tot.} \cdot V_{ges.} = 1.000 \text{ NI}$ (Kammern und Gassystem) ergibt sich hieraus ein Normalfluß von:

$$p_{Leit.} \frac{dV}{dt} = k_{Fit} \cdot p_{tot.} \cdot V_{ges.} = (34,7 \pm 1,3) \text{ NI/h}$$

Eine 99,0%-ige Annäherung an c_∞ wurde nach etwa (123 ± 9) Stunden (~ 5 Tagen) erreicht. Die Parameter der Anpassungsfunktion an die Meßwerte werden nun verglichen mit den Werten die sich ergeben, wenn mit der im Gassystem gemessenen Flußrate von

$$p_{Leit.} \frac{dV}{dt} = k_{gem.} \cdot p_{tot.} \cdot V_{ges.} = (78,0 \pm 7,8) \text{ NI/h}$$

eine Funktion wie 5.8 berechnet wird (gestr. Linie in Abb. 5.10). Vorausgesetzt werden eine ideale Durchmischung der Gase, dieselbe Ausgangskonzentration bei $t = 66,5 \text{ h}$ und das Erreichen derselben Endkonzentration c_∞ .

$$C_{(id.Misch.)} = c'_0 \cdot e^{-k't} + c_\infty = (-251,33 e^{-0,0780 \cdot t/h} + 2,015) \text{ A\%}$$

Mit den Parametern c'_0 , k' wird eine 99,0%-ige Annäherung an c_∞ schon nach etwa $(54^{+6,2/-5})$ Stunden ($\sim 2\frac{1}{4}$ Tagen) erreicht. Die tatsächliche Durchmischung des Ethanolampfes mit dem Gasgemisch Argon/Propan geschieht also etwa 2,25 mal langsamer als bei der idealisierten Annahme. Vergleichbare Resultate wurden mit allen getesteten Kammern und den dazugehörigen Kreisläufen gemessen [ETI93] und entsprechen den Erfahrungen mit den anderen Mischmethoden (vergl. Kapitel 5.3).

Nach diesen positiv verlaufenen Funktionsprüfungen wurde die Anlage in der Runperiode 1993 mit allen Behältern eingesetzt. Die Meßdaten des Druckes und der Temperatur im Behälter vermitteln einen ersten Eindruck über das Langzeitverhalten der wichtigsten Parameter der Zumischanlage. Als Beispiel sind in Abb. 5.11 etwa 4.000 Meßwerte des Ethanolbehälters für die MWPCs und Planaren Kammern vom 5.3. bis zum 16.11.1993 (=Tag 430–686) dargestellt. Ein Punkt symbolisiert einen stündlich ausgelesenen aktuellen Meßwert. Die Unterbrechungen in den aufgezeichneten Daten sind keine Ausfallzeiten des Gassystems. Während dieser Zeiträume war lediglich eines der benutzten Aufnahmeprogramme [DDR92] inaktiv oder die Verbindungskette Gassystem \Leftrightarrow MAC¹ \Leftrightarrow VXDESY² \Leftrightarrow DESIBM³ unterbrochen.

Im oberen Diagramm ist der Druckverlauf dargestellt, der in diesem geschlossenen Kreislauf vom Druck des Puffervolumens ("Barrel") abhängt. Drücke um 0 mbar bedeuten, daß die Anlage nicht im Kreislauf war. Bis zur Aktivierung der Barreldruckregulierung ab etwa 1. Juli 1993 (Tag 548) sind Druckschwankungen von maximal ± 180 mbar zu erkennen. Ab diesem Datum war der Druck bei einem Mittelwert von 161,3 mbar und einer mittleren Abweichung von $\pm 15,2$ mbar deutlich stabiler. Hohe Werte bis ca. 800 mbar

1. MAC = log. Name für Macintosh® Computer mit Programm "MONI" im Hauptkontrollraum
2. VXDESY = log. Name für das Digital VAX®-Cluster im DESY (2x 6000–410, 1x 9000–210)
3. DESIBM = log. name für DESY – IBM® 9000/720

an den Tagen 549/550 (2./3.07.93) wurden durch den Ausfall der Detektorkühlung verursacht ($p > 450 \text{ mbar}$ außerhalb der Abb.). Die zum Druckausgleich aus dem Detektor abtransportierte Gasmenge führte folglich zur einer deutlichen Druckerhöhung im Barrel (vergl. Kap. 6.2).

Der im unteren Diagramm dargestellte Temperaturverlauf wird beeinflusst durch Kühlschranktemperatur, Regelverhalten der Zusatzheizung und die Temperatur der fünf weiteren Behälter. Die Nominaltemperatur war vom 5.3. bis 16.5.93 (Tag 430–502) auf 0°C und im folgenden Zeitraum auf $-1.5 / -1.0^\circ\text{C}$ eingestellt. Hierbei wurden keine der technisch möglichen Optimierungen vorgenommen (z.B. Anpassung der Heizleistung, Isoliermaterial, etc.). Die bei normalen Betriebsbedingungen gemessenen Werte lassen sich in vier Zeiträume einordnen. Dabei liegen die Temperaturen in einem engen Bereich um den Mittelwert (Tab. 5.3). Tiefere Temperaturen zeigen an, daß in diesem Zeitraum die Regelung der Zusatzheizung ausgeschaltet war. Höhere Temperaturen wurden bei Wartungsarbeiten durch ein damit verbundenes Öffnen des Kühlschranks verursacht.

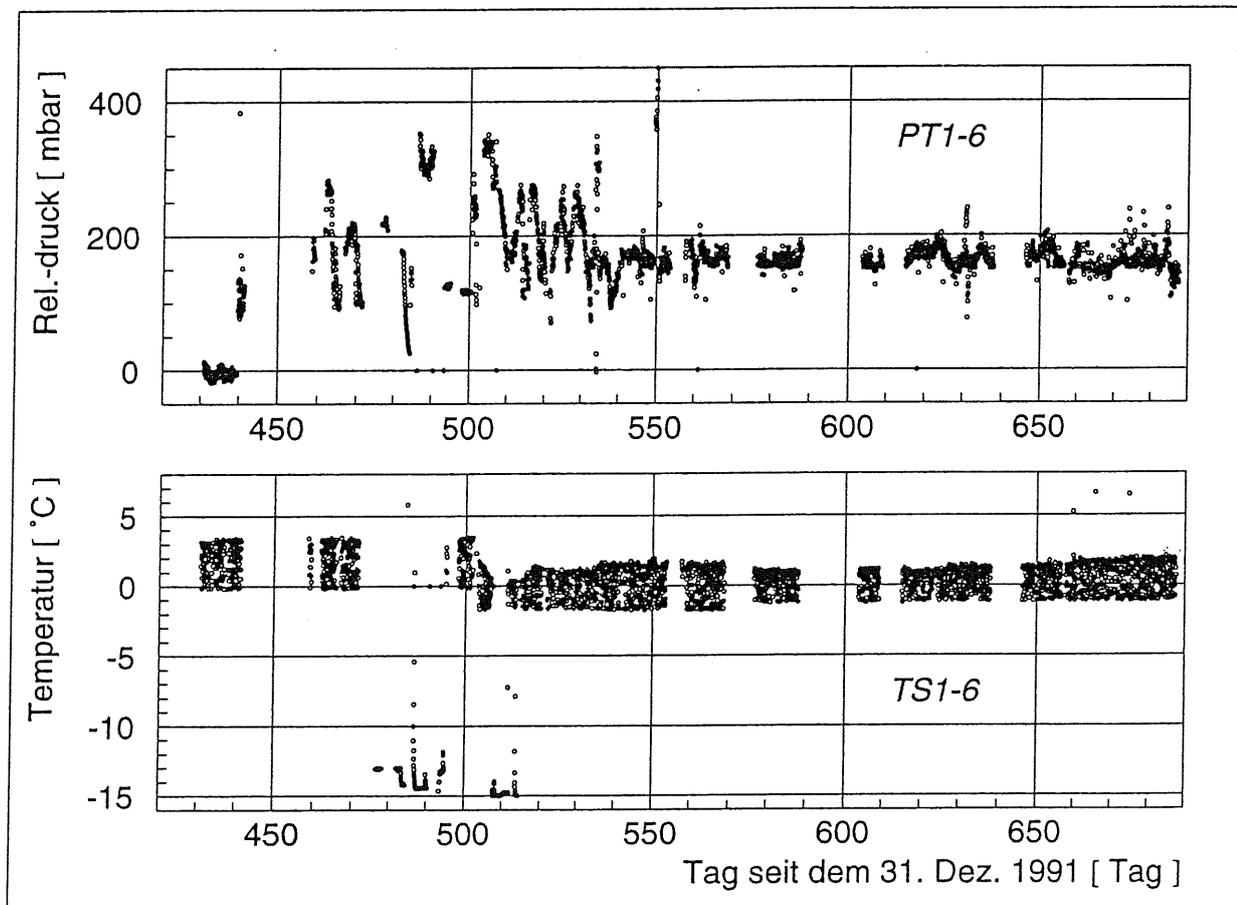


Abb. 5.11: Druck und Temperatur im Behälter 1 der Zumischanlage, Runperiode 1993

Abschließend läßt sich festhalten, daß die neue Anlage sehr gut funktioniert. Bei Änderung der Solltemperatur des Additivs führt das langsame Mischungsverhalten der Gase zu Stabilisierungsphasen im Bereich von Tagen. Wegen der langen Zeiträume, die zu einer signifikanten Änderung des Additivanteils notwendig sind, haben die kurzzeitigen Temperatur- und Luftdruckschwankungen nur geringen Einfluß.

Tag	Datum	Mittelwert	±RMS* [°C]	Tagesmittel	±RMS* [°C]
431 – 471	6.3. – 15.4.	1,826	1,125	1,829	0,126
520 – 570	3.6. – 23.7.	0,168	0,994	0,155	0,219
575 – 640	28.7. – 1.10.	0,267	0,713	0,271	0,220
645 – 686	6.10. – 16.11.	0,510	1,095	0,503	0,197

$$RMS^* = \sqrt{\frac{\sum (x_m - x_i)^2}{N-1}} = \text{quadratisch gemittelter Fehler der Einzelmessung}$$

Tab. 5.3: Temperaturmittelwerte des Behälters 1 der Zumischanlage; Runperiode 1993

Daher ist es sinnvoll, hier die Tagesmittelwerte des Druckes $\langle p_T \rangle = (161,3 \pm 10,8)$ mbar (ab Tag 548) und der Temperatur (Tab. 5.3) zu betrachten. Nach Gleichung 5.6 verursachen die Druckschwankungen bezogen auf den mittleren Gesamtdruck von $\langle p_{ges.} \rangle = \langle p_T \rangle + \langle p_L \rangle = 1175$ mbar eine relative Konzentrationsänderung von weniger als 1%.

$$\frac{\Delta c(p_{ges.})}{c} = \frac{\langle \Delta p_T \rangle}{\langle p_{ges.} \rangle} = \frac{10,8}{1175} = 0,0092$$

Nach 5.7 und den Konstanten aus Tab. 5.2 berechnet sich die relative Abweichung des Alkoholgehaltes durch Temperaturabweichungen zu etwa 1,4%. Dabei wurde die Temperatur $\langle T \rangle$ und die Standardabweichung $\langle \Delta T \rangle$ als Mittelwert der "Tagesmittel" aus Tab. 5.3 errechnet.

$$\frac{\Delta c(T)}{c} = \frac{3803,98}{(\langle T \rangle - 41,68 \text{ K})^2} \langle \Delta T \rangle = 0,014 \quad \text{mit: } \langle T \rangle = 273,85 \text{ K} \\ \langle \Delta T \rangle = 0,2 \text{ °C}$$

Diese geringen Abweichungen liefern eine so stabile Additivkonzentration, daß weitere Optimierungen der Zumischstation überflüssig sind.

5.5 Vorgemische

Bevor die gemessenen Ergebnisse mit Vorgemischen von verschiedenen Herstellern vorgestellt werden, wird die Qualität der Ausgangsgase zur Gemischherstellung erläutert und das Zustandekommen systematischer Fehler in der Gemischzusammensetzung diskutiert.

Aufgrund der physikalischen und chemischen Stabilität sind die Edelgase am reinsten herzustellen. So sind von allen Gasherstellern ([BOC01, MGR01, AGA01]) die Gase Helium und Argon mit einem garantierten Reinheitsgehalt von 99,996 Vol% bis 99,99990 Vol% zu beziehen. Helium wird zum Betrieb des Gaschromatographen, zu Spülzwecken und als Gaskomponente in den Radiatoren sowie den Radialen Driftkammern benötigt. Argon bildet den Hauptbestandteil aller übrigen Kammergase. Häufigste Verunreinigungen im ppm-Bereich sind Wasser, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff. Bei dem aus der Luft gewonnenen Xenon beträgt die Standardreinheit mindestens 99,9 Vol%. Ein Kryptongehalt von 950 ppm stellt den größten Fremddanteil dar, der die Kammerfunktion nicht stört (Anteile in normaler Luft: Xe: 0,08 ppm, Kr: 1,139 ppm). Xenon wird zur Detektion von Übergangsstrahlung in den Radialen Kammern eingesetzt.

Im Gegensatz dazu sind die gesättigten Kohlenwasserstoffe wie Methan, Ethan und Propan nur mit Reinheiten zwischen 99,0 Vol% und 99,9.. Vol% erhältlich. Diese Alkane stellen den zweiten Hauptbestandteil der H1-Kammern dar. Mit der gleichen Reinheit ist der halogenierte KW Freon zu beziehen, der in geringer Konzentration zum Schutz vor Alterungserscheinungen in einigen kleinen Zentralkammern eingesetzt wird. Eine Reinigung durch physikalische Trennmethode ist aufgrund der Ähnlichkeit der Gasparameter nicht sehr effektiv. Neben den oben erwähnten Verunreinigungen stellen daher die höheren Kohlenwasserstoffe den größten Fremanteil in diesen Gasen dar.

Weiterhin werden Wasser, Ethanol und 2-Propanol in flüssiger Form bezogen, deren Dämpfe in den Kammern eine ähnliche Wirkung wie Freon haben. Diese Stoffe werden durch fraktionierte Destillation gewonnen und mit einer Reinheit von besser als 99,9 Vol% angeboten. Bei den Alkoholen beträgt der Wasseranteil bis zu 0,1 Vol%.

Bei der Verwendung von Reinstgasen oder Vorgemischen aus denselben ist folglich ein gewisser Fremdgasanteil unvermeidlich. Dieser Anteil läßt sich durch den Einsatz von Reinigern in den Gassystemen noch weiter reduzieren.

Bei der Verwendung von Vorgemischen für Drahtkammern ist die Langzeitstabilität der Gaszusammensetzung wichtiger als deren absolute Genauigkeit. Zur Herstellung eines Gasgemisches nach der gravimetrischen oder der manometrischen Methode wäre es folglich sinnvoll, stets dieselbe Anlage und dasselbe Mischrezept zu benutzen. Hiermit würde eine optimale Reproduzierbarkeit der Mischung erreicht werden. Da immer dieselben systematischen Fehler eingehen, wird bei der Reproduktion eine konstante Mischung erreicht. Bei den mit den Gassystemen oder bei DESY hergestellten Gasgemischen können diese Bedingungen eingehalten werden, aber bei industriell hergestellten Mischungen kann nicht davon ausgegangen werden. Beiden Herstellungsmethoden gemeinsam ist die Erstellung eines Mischrezeptes. Darin werden die Enddrücke berechnet, bis zu welchen die einzelnen Gaskomponenten nacheinander eingefüllt werden sollen. Um die Partialdrücke in Molanteilen auszudrücken, stehen diverse Methoden zur Verfügung. Das nur näherungsweise beschreibbare Realgasverhalten von Gasgemischen begrenzt die Genauigkeit. Unterschiedliche Methoden führen zu systematischen Abweichungen vom Absolutwert. Zur Erklärung werden die wichtigsten in der Praxis angewendeten Berechnungsmethoden am Beispiel des Gasgemisches Argon/Ethan 48/52 vorgeführt.

In das evakuierte Mischgefäß werden bei einer konstanten Temperatur von 20°C erst 26,0 bar Ethan und danach 24,0 bar Argon bis zum Enddruck von $p_{ges.} = 50,0$ bar eingefüllt. Das ist für dieses Gasgemisch der typische maximale Fülldruck. Bei höheren Drücken und niedriger Lagertemperatur besteht sonst die Gefahr, daß sich Ethan teilweise wieder verflüssigt. Dieser Effekt tritt bei höheren Kohlenwasserstoffen schon bei niedrigeren Drücken auf, da deren Dampfdruckkurven niedriger verlaufen.

a) Unter der Voraussetzung idealer Gase ist das Molenverhältnis X_i/X_j von Argon/Ethan mit dem Partialdruckverhältnis p_i/p_j identisch. Die Ethankonzentration c_{Ethan} berechnet sich zu:

$$c_{Ethan}^a = \frac{p_{Ethan}}{p_{Ethan} + p_{Argon}} = \frac{26,0 \text{ bar}}{26,0 \text{ bar} + 24,0 \text{ bar}} = \frac{X_{Ethan}}{X_{Ethan} + X_{Argon}} = \underline{0,520}$$

Diese einfache Rechnung ist nur bei sehr kleinen Drücken richtig und stellt hier nur eine erste grobe Näherung dar. Zur Angabe des Molanteils hat sich die leicht irreführende Sprechweise "Konzentration: $c_{Ethan} = 52 \text{ Vol}\%$ " eingebürgert. Wie allgemein üblich, ist in dieser Arbeit aber immer der Molanteil gemeint!

Bei den drei folgenden Methoden wird der Kompressibilitätsfaktor Z benötigt, der in der Literatur auch Amagatwert oder Realgasfaktor genannt wird. Er beschreibt die Abweichung vom Idealgasverhalten und ist wie folgt definiert:

$$Z = \frac{p \cdot V}{R \cdot T}$$

Im Beispiel sind Druck p und Temperatur T fest vorgegeben. Zur Bestimmung von Z kann das reale Molvolumen V aus diversen Zustandsgleichungen (z.B. van der Waals) gewonnen werden [RPS77]. Durch Einführung dieses Korrekturfaktors vereinfachen sich nachfolgende Mischungsregeln, deren Gültigkeitsbereich maximal auf schwach polare Substanzen begrenzt ist.

b) Nach Dalton addieren sich die Partialdrücke der Einzelgase zum Gesamtdruck:

$$p_{ges.} = p_{Ethan} + p_{Argon}$$

Die Partialdrücke der Komponenten werden zunächst mit dem jeweiligen Realgasfaktor Z_i korrigiert:

$$p_{Ethan}^b = \frac{p_{Ethan}}{Z_{Ethan} \cdot (p_{Ethan}, T)} = 34,67 \text{ bar} \quad \text{mit : } Z_{Ethan}(26\text{bar}, 20^\circ\text{C}) = 0,75$$

$$p_{Argon}^b = \frac{p_{Argon}}{Z_{Argon} \cdot (p_{Argon}, T)} = 24,49 \text{ bar} \quad \text{mit : } Z_{Argon}(24\text{bar}, 20^\circ\text{C}) = 0,98$$

Aus den so korrigierten Drücken p^b berechnet sich der Ethangehalt wie oben zu:

$$c_{Ethan}^b = \frac{p_{Ethan}^b}{p_{Ethan}^b + p_{Argon}^b} = \frac{X_{Ethan}}{X_{Ethan} + X_{Argon}} = \underline{0,586}$$

Auch diese Methode ist im allgemeinen mit Vorsicht zu betrachten, obwohl hier ein relativ genaues Ergebnis erzielt wird. Nach [ISO02] sind die nach Dalton berechneten Werte nur für Enddrücke von $p_{ges.} < 3 \text{ bar}$ hinreichend genau. Wenn bei hohen Drücken mit der Formel gearbeitet werden soll, müssen die Z_i stark unterschiedlich sein.

c) Bei der Methode nach Amagat werden die Teilvolumina zum Gesamtvolumen des Gasgemisches addiert.:

$$V_{ges.} = V_{Ethan} + V_{Argon}$$

Die weitere Berechnung verläuft genau wie bei der Daltonmethode, außer daß der Realgasfaktor Z_i der Komponenten immer beim Gesamtdruck $p_{ges.}$ der Mischung angesetzt wird. Eine Anwendung ist bis zu hohen Drücken zulässig [ISO02].

$$p_{Ethan}^A = \frac{p_{Ethan}}{Z_{Ethan} \cdot (p_{ges.}, T)} = 130 \text{ bar ?!} \quad \text{mit : } Z_{Ethan}(50\text{bar}, 20^\circ\text{C}) = 0,2$$

$$p_{Argon}^A = \frac{p_{Argon}}{Z_{Argon} \cdot (p_{ges.}, T)} = 24,74 \text{ bar} \quad \text{mit : } Z_{Argon}(50\text{bar}, 20^\circ\text{C}) = 0,97$$

Die Methode nach Amagat versagt hier, da die Bestimmung des Z -Wertes von Ethan mit $T > T_{kr.}$ und gleichzeitig $p_{ges.} > p_{kr.}$ außerhalb des Gültigkeitsbereiches liegt. Deshalb wird der korrigierte Partialdruck des Ethans zu hoch und das Endergebnis ist nicht korrekt.

$$c_{Ethan}^c = \frac{p_{Ethan}^c}{p_{Ethan}^c + p_{Argon}^c} = \frac{X_{Ethan}}{X_{Ethan} + X_{Argon}} = \underline{0,840}$$

d) Bei der Methode nach Kay [RPS77] werden die kritischen Konstanten $T^{kr.}$, $p^{kr.}$ und $Z^{kr.}$ der Einzelgase zu den 'pseudokritischen' Konstanten der Mischung m gemittelt. Der Wichtungsfaktor ist hierbei der auf den Enddruck bezogene, unkorrigierte Partialdruck der Komponenten:

$$T_m^{kr.} = \left(\frac{p_{Ethan}}{p_{ges.}} T_{Ethan}^{kr.} \right) + \left(\frac{p_{Argon}}{p_{ges.}} T_{Argon}^{kr.} \right) = (0,52 \cdot 305,4 \text{ K}) + (0,48 \cdot 150,8 \text{ K}) = 231,19 \text{ K}$$

$$p_m^{kr.} = (0,52 \cdot p_{Ethan}^{kr.}) + (0,48 \cdot p_{Argon}^{kr.}) = (0,52 \cdot 48,84 \text{ bar}) + (0,48 \cdot 48,74 \text{ bar}) = 48,79 \text{ bar}$$

$$Z_m^{kr.} = (0,52 \cdot Z_{Ethan}^{kr.}) + (0,48 \cdot Z_{Argon}^{kr.}) = (0,52 \cdot 0,285) + (0,48 \cdot 0,295) = 0,290$$

Jetzt werden Temperatur T und Enddruck $p_{ges.}$ in allgemeine reduzierte Variablen T_{rm} , p_{rm} transformiert indem beide auf die pseudokritischen Konstanten des Gemisches bezogen werden:

$$T_{rm} = \frac{T}{T_m^{kr.}} = \frac{293,15 \text{ K}}{231,19 \text{ K}} = 1,268 \quad \text{und} \quad p_{rm} = \frac{p_{ges.}}{p_m^{kr.}} = \frac{50,0 \text{ bar}}{48,79 \text{ bar}} = 1,025$$

Die Darstellung in reduzierten Variablen bietet den Vorteil, daß der Mischungsamagat $Z_m = f(T_{rm}, p_{rm}, Z_m^{kr.})$ für alle Gasgemische in einer gemeinsamen Darstellung abgelesen werden kann. Aus der "Lydersen"-Tabelle in [ISO02] wird für dieses Beispiel der Realgasfaktor zu $Z_m = 0,86$ abgelesen. Jetzt kann der Molanteil des Ethan wie folgt bestimmt werden:

$$c_{Ethan}^d = \frac{p_{Ethan}}{Z_{Ethan}(p_{Ethan}, T)} \frac{Z_m}{p_{ges.}} = \frac{26,0 \text{ bar}}{0,75} \frac{0,86}{50,0 \text{ bar}} = \underline{0,596}$$

Der Bereich mit der höchsten Genauigkeit dieser Methode wird durch folgende Beziehungen eingegrenzt:

$$0,2 < \frac{T_i^{kr.}}{T_j^{kr.}} < 0,5 \quad \text{hier: } \frac{T_{Argon}^{kr.}}{T_{Ethan}^{kr.}} = \frac{150,8 \text{ K}}{305,4 \text{ K}} = 0,49 \quad \text{und}$$

$$p_i^{kr.} \approx p_j^{kr.} \quad \text{hier: } p_{Argon}^{kr.} = 48,74 \text{ bar} \approx p_{Ethan}^{kr.} = 48,84 \text{ bar}$$

Da hier beide Bedingungen erfüllt sind, kann davon ausgegangen werden, daß diese Methode auch das beste Ergebnis liefert.

Die aus denselben Druckmeßwerten, jedoch nach unterschiedlichen Verfahren berechneten Ethananteile sind in Tab. 5.4 zusammengefaßt. Zum Vergleich der Genauigkeiten sind die relativen Konzentrationsabweichungen auf das Ergebnis nach Kay bezogen. Das Bezugsergebnis selbst hat eine typische Genauigkeit von etwa 3%.

Methode	ideales Gas	Dalton	Amagat	Kay
c_{Ethan}	0,520	0,586	0,840 ?!	0,596
$\Delta c / c_{\text{Kay}}$	12,8 %	1,6 %	41 % ?!	(-3%)

Tab. 5.4: Vergleich der Genauigkeit verschiedener Methoden zur Bestimmung des Ethananteils aus den Partialdrücken

Die systematischen Abweichungen, die in diesem einfachen Beispiel der zweikomponentigen Mischung Argon/Ethan auftreten, zeigen eindrucksvoll, daß es nicht ganz unerheblich ist, mit welcher Methode das Mischungsrezept berechnet wird. Ein solches Rezept wird sowohl als Grundlage zur Mischung nach Partialdruckmethode als auch nach manometrischer Methode benötigt. Bei jeder Gasmischung sind bei der Berechnung die Randbedingungen zu beachten, welche den Gültigkeitsbereich der individuellen Methode einschränken. Ein wesentliches Kriterium bei allen Methoden zur Realgaskorrektur, ist die Genauigkeit des Kompressibilitätsfaktors Z_j . Da das Realgasverhalten von Gasmischungen durch keine Zustandsgleichung exakt beschrieben wird, erhält man mit verschiedenen Gleichungen auch abweichende Werte für die $Z_{i,j}$ und beim Einsetzen einen systematischen Unterschied in der berechneten Konzentration. Zur Aufstellung eines guten Rezeptes bildet die präzise Wägung bei der gravimetrischen Methode die Eichgrundlage für die manometrische Methode und Analysegeräte. Iterativ können nach den Wäageergebnissen die Partialdrücke im Rezept den gewünschten Konzentrationen angenähert werden.

Anhand einiger Beispiele werden Erfahrungen vorgestellt, die mit Gasen und Vorgemischten unterschiedlichen Ursprungs im Verlauf der letzten Jahre gesammelt wurden. Die qualitativen und quantitativen Analysen wurden hauptsächlich mit einem Gaschromatographen [VAR37] durchgeführt. Bei den Reinstgasen ist in einem Fall Kohlendioxid statt Xenon von der Industrie geliefert worden. Dieses war ein Einzelfall und sollte nicht verallgemeinert werden. Ohne eine Gasanalyse wäre diese Gasflasche jedoch zur Mischung eingesetzt worden, was natürlich fatale Folgen für den Betrieb der angeschlossenen Kammer gehabt hätte.

Als Beispiel für eine gravimetrische Mischung eines zweikomponentigen Gemisches diene Wasserstoff/Helium, mit einem Wasserstoffsollgehalt von 5% [LIN04]. Der Fülldruck der gelieferten Flasche betrug 150 bar. Dieser Druck darf im Gegensatz zur Argon-Ethan-Mischung so hoch sein, da beide Komponenten unter Normalbedingungen einen hohen Dampfdruck besitzen, so daß auch bei niedrigen Lagertemperaturen keine Verflüssigung auftreten kann. Wegen möglicher konzentrationsverschiebender Effekte wie Leckage des Flaschenventils, Desorption von Fremdgasen aus der inneren Flaschenoberfläche und Diffusion durch die Flaschenwände beträgt die Stabilitätsgarantie der Mischungskonzentration maximal zwölf Monate. Laut werksseitiger, gaschromatographischer Analyse [LIN04] beträgt der Wasserstoffanteil $c_{\text{ist}} = 4,82$ Vol% innerhalb einer typischen relativen Analysengenauigkeit von $\Delta c/c = \pm 2$ %. Die systematische Abweichung vom Sollwert $(c_{\text{soll}} - c_{\text{ist}})/c_{\text{soll}} = (5,00 - 4,82) / 5,00 = 0,036$ beträgt hier beachtliche 3,6 %. Da dieses Gasgemisch wie auch alle anderen in Drift- und Proportionalkammern benötigten Gasgemische keine industrielle Anwendung hat, sind die Mischungsrezepte nicht gut genug opti-

miert und es muß mit systematischen Abweichungen von einigen Prozent gerechnet werden. Eine Annäherung an die gewünschte Konzentration ist sehr zeit- und kostenintensiv.

Im nächsten Beispiel werden einige manometrisch hergestellte Gasmischungen Argon-Ethan mit einem Sollverhältnis 50/50 verglichen. Die Messungen wurden in den Jahren 1990 und 1991 im RAL und im DESY durchgeführt. In Tab. 5.5 sind die Mittelwerte aus mindestens acht Einzelmessungen dargestellt. Der mittlere statistische Meßfehler beträgt $\pm 0,2$ Vol% mit einem geschätzten maximalen systematischen Fehler der Eichung von etwa $\pm 3,0$ Vol%.

Proben Nr.	(Soll)	1	2	3	4	5
C_{Argon}	50,0	50,3	52,8	56,2	54,8	54,6
$C_{\text{soll}} - C_{\text{gem.}} / C_{\text{soll}}$	--	0,6 %	5,6 %	12,4 %	9,6 %	9,2 %

Tab. 5.5: gemessener Argongehalt verschiedener nach dem manometrischen Verfahren hergestellter Gasproben

Die Probe Nr.1 stammt aus dem bei kleinem Druck im Gassystem I angemischten Gas, welches beim Testrun im RAL hergestellt wurde. Durch Nachmischen (vergl. 5.3) konnte dieser Wert auf 50.0 Vol% korrigiert werden. Die Proben Nr.2 und Nr.3 wurden auf dem DESY-Gelände mit einem Fülldruck von etwa 56 bar hergestellt und waren zum Zeitpunkt der Analyse schon älter als ein Jahr und teilweise gebraucht. Da bei den DESY-Gasmischungen stets ein Mischungsprotokoll geführt wird, konnte als Ursache für die starken Abweichungen fehlende Sorgfalt bei der Herstellung ausgeschlossen werden. Die Ursache konnte demnach nur eine ungünstige Lager- oder Entnahmebedingung sein. Die weiteren Proben stammen aus derselben Quelle wurden aber zu einem späteren Zeitpunkt nach einem anderen Mischrezept hergestellt. Bei den nachfolgenden Gaslieferungen wurde ebenfalls ein zu hoher Argonanteil von über 53 Vol% gemessen. Als mögliche Ursache hierfür wurde ein Kalibrationsfehler des Gaschromatographen und eine fehlende Optimierung des Mischungsrezeptes in Betracht gezogen. Dankenswerterweise wurde von den Mitarbeitern des DESY-Gaselagers eine zeitintensive gravimetrische Kontrolle des Mischrezeptes durchgeführt. Als Resultat wurde ein Argongehalt von $(53,0 \pm 0,05)$ Vol% ermittelt, wodurch die große Differenz zu den gemessenen Ergebnissen erklärbar wurde. Angesichts der Genauigkeit der verwendeten Waage und fehlender Klimatisierungsmöglichkeiten erscheint die Toleranzangabe sehr optimistisch. Die Ursache der systematischen Abweichung lag in der Genauigkeit der Bestimmung des Amagatwertes für Ethan (s.o.).

Im folgenden Zeitraum wurde dieses Gasgemisch mehrmals variiert, bis sich bei einem Argonanteil von 48 Vol% eine optimale Arbeitsweise der Kammern herauskristallisierte. Danach wurden wieder gravimetrische Eichmischungen zur Kalibration des Gaschromatographen hergestellt und die Verbrauchsgase mit dem modifizierten Rezept nach manometrischer Methode gemischt. Innerhalb einer Gaslieferung von typisch sechs parallel gefüllten Flaschen wurden nie Abweichungen größer als 1 Vol% festgestellt. Jede neue Gaslieferung wird vor der Verwendung analysiert. Bei einer Abweichung von mehr als 1 Vol% gegenüber der Eichmischung muß die komplette Charge von der Verwendung

ausgeschlossen werden. In Tab. 5.6 sind die von DESY hergestellten Vorgemische aufgelistet, die in den H1-Gassystemen verwendet wurden. Die eingetragenen Werte sind lediglich als Beispiel aus der Runperiode 1993 zu betrachten, da die Gasart, das Verhältnis der Komponenten und der Gasmengenbedarf den aktuellen Anforderungen der Kammern angepaßt werden.

Detektorteil(e)	Gasvol.	Gasmischung	Verhältnis	Gasbedarf	Zweck
Name	[l]	Namen der Gase	[Vol %]	[l/d]	
Planare + F-MWPCs	-900	Argon/Propan	90/10	< 50	R
Radiale	-700	Argon/Ethan	48/52	< 40	R
Radiatoren	-500	Helium/Ethan	60/30	~ 100	K
CJC 1	-1140	1) Argon/Kohlendioxid/ Methan	89,5/9,5/1	~ 2.200 / < 50	K / R
CJC 2	-3080	2) Argon/Ethan	50/50	~ 6.600 / < 100	K / R
CIZ	-55	Argon/Methan	80/20	~ 150	K
COZ	-240	Argon/Ethan	48/52	~ 280	K
CIP	-30	Argon/Ethan/Freon®12	49,9/49,9/0,2	~ 90	K
COP	-150	Argon/Ethan/Freon®12	49,9/49,9/0,2	~ 150	K
B-MWPC	-120	Argon/Ethan/Freon®12	49,9/49,9/0,2	~ 180	K

R = "Refresh Mode" partieller Gasaustausch (vergl. Kap. Reiniger)
K = komplette Gasversorgung für offene Kreisläufe

Tab. 5.6: Liste der verwendeten Vorgemische, die von [DESB2] für die H1-Tracking-Detektoren hergestellt wurden

Es wurde gezeigt, daß die Qualität der Reinstgase zur Mischung von Kammergasen ausreichend ist. Durch den Einsatz von Gasreinigern in den geschlossenen Gaskreisläufen sollte der Anteil von Fremdgasanteilen weiter reduziert werden können. Die Realgaskorrekturen von Mischungen sind nicht exakt berechenbar und führen zu systematischen Abweichungen in der Gaszusammensetzung. Die einzige Möglichkeit den Mischungsanteil auf typisch besser als 1% zu bestimmen, ist die Herstellung nach der gravimetrischen Methode. Die Möglichkeiten zur Gemischherstellung bei DESY und innerhalb der geschlossenen Kreisläufe der Gassysteme bieten den Vorteil einer hohen Reproduzierbarkeit und Langzeitstabilität der Gaszusammensetzung. Um die Betriebsbedingungen der zu versorgenden Kammern zu optimieren, kann die Gaszusammensetzung individuell und kurzfristig geändert werden, was bei von der Industrie bezogenen Vorgemischen nicht möglich ist. Bevor irgendeine Gasflasche mit Reinstgas oder Vorgemisch an die Anlagen angeschlossen wird, ist es sinnvoll, deren Inhalt mit einem Gaschromatographen zu analysieren.

6. Druck und Fluß in den Kreisläufen

Zur Einführung wird das bei den H1-Gassystemen verwendete Konzept zur Kammerdruckregulierung diskutiert. Die wichtigsten Bauelemente zur Erzeugung von Druckdifferenzen und Flüssen in den Gaskreisläufen werden anschließend vorgestellt. Es folgt eine Beschreibung der Aufteilung der Gasflüsse auf die individuellen Kammern, des Aufbaus zur Messung des Kammerinnendrucks sowie der Druckverhältnisse innerhalb des Detektors. Abschließend werden Arbeitsweise und Erfahrungen mit der Druckregulierung der Kammern vorgestellt.

6.1 Einführung Kammerdruckregulierung

Wie in Kapitel 4. beschrieben, sind die Kreisläufe zur Versorgung der H1-Tracking-Kammern in drei unabhängigen, jedoch nahezu identischen Gassystemen organisiert. Das Aufbauschema aller Kreisläufe ist weitgehend standardisiert (Abb. 4.1). Insbesondere besitzt jeder Kreislauf eine eigene, unabhängige Kammerdruckregulierung. Im erwähnten Kapitel wurde ebenso ein Überblick über die Lage der einzelnen Bauteilgruppen und die Verbindungsleitungen im Gebäude des H1-Experiments gegeben (Abb. 4.2) sowie grob deren Funktionsweise erklärt.

Die wichtigste Aufgabe der Anlagen ist, den Druck in den Kammern innerhalb der Grenzwerte zu halten. Die Drücke waren zum Zeitpunkt der Planung nominal $p_N = (p_L + 15 \pm 10)$ Pa und maximal $p_{max.} = (p_L \pm 100)$ Pa für alle Vorwärts-Kammern und $p_N = (p_L + 200 \pm 20)$ Pa und $p_{max.} = (p_L \pm 500)$ Pa bei den kleinen Kammern des Zentralbereiches, wobei p_L der umgebende Luftdruck ist. Die beiden zentralen Jetkammern sollten bei einem absoluten Druck von $p_N = (105 \pm 0,5)$ kPa und einem maximal zulässigen Druck von $p_{max.} = 120$ kPa betrieben werden. Die räumlich benachbarten Kammern werden aus Sicherheitsgründen mit denselben Druckgrenzen leicht oberhalb des Umgebungsluftdrucks geregelt, obwohl einige Kammern mechanisch höher belastbar wären. Die "empfindlichen" Kammern im Detektor sind über die Außenwand mit mindestens einer Nachbarkammer mechanisch gekoppelt. Bei schlagartigem Druckabfall in einer auf konstantem Überdruck geregelten "stabilen" Kammer würde der Gasfluß in der (den) empfindlichen Nachbarkammer(n) nicht ausreichen, um genügend schnell einen Druckausgleich herbeizuführen.

Bei Regelung des Kammerdrucks relativ zum Luftdruck haben die durch dessen Schwankungen verursachten Gasdichteänderungen nur geringe Auswirkungen auf die Meßeigenschaften der Kammern. Da die Kammern typisch im Bereich der Sättigung der Driftgeschwindigkeit betrieben werden, sind die Auswirkungen darauf minimal (vergl. Kap. 3.2). Durch Messung des Luftdrucks und der Temperatur des Gases in den Kammern oder

mit den gemessenen Kammerdaten allein, kann der Effekt in den Meßdaten leicht korrigiert werden. Die Auflösung der Energieverlustmessung ändert sich theoretisch um etwa 2% (FWHM), wenn Luftdruckschwankungen in einem typischen Bereich von ± 2 kPa (± 20 mbar) angenommen werden (vergl. Kap. 3.2). Diese Abweichung sollte nicht meßbar sein, da die typische Energieauflösung von Driftkammern im Bereich von 12% (FWHM) liegt [GRS87]. Ähnlich sind die Verhältnisse bei der Messung von Übergangsstrahlung. Da aus Gründen der Röntgentransparenz die Kammern zur Detektion derselben in den meisten Experimenten mechanisch empfindliche Folienwände haben, wird der Druck darin relativ zum Luftdruck geregelt. Weil in diesen Experimenten keine Probleme aufgrund von Gasdichteschwankungen beobachtet wurden, ist auch bei den Radialen Driftkammern im H1-Experiment nicht damit zu rechnen.

Eine wesentliche, jedoch der Druckregulierung untergeordnete Zusatzbedingung, ist die Bereitstellung einer Durchflußrate, die maximal dem vierfachen Austausch des Kammerolumens pro Tag entspricht (vergl. Tab. 4.1). Aus Sicherheitsgründen ist eine grobe Kontrolle der Flußbilanz (-20%) zu gewährleisten.

Um den Druck in den angegebenen Grenzen zu halten, werden nach Maßgabe des automatisch gemessenen, aktuellen Kammerdrucks einfache Magnetventile computergesteuert geöffnet bzw. geschlossen. Sowohl der Gasfluß zu als auch der von den Kammern kann hierbei durch mechanische Schwebekörper-Durchflußmesser manuell eingeregelt und grob abgelesen werden. Eine elektronische Flußkontrolle in den Versorgungsleitungen der Kammern erfolgt durch senkrecht zur Strömung eingebaute Differenzdruckmesser oder durch die in Gassystem III eingebauten Massenflußmesser (vergl. Kap. 5.2). Die Flußraten zu und von den Kammern werden von zwei unabhängigen Potentialen bestimmt. Für den Fluß aus den Kammern ins Gassystem ist die Höhe des Unterdrucks der Kreislaufpumpe verantwortlich. Für den Gasfluß in die Kammern ist bei offenen Kreisläufen der reduzierte Druck der Vorratsbehälter und in geschlossenen Kreisläufen der Barreldruck entscheidend.

Warum wurde nun das Konzept zur Gasversorgung so geplant und nicht einfacher oder komplizierter?¹

Die einfachste Möglichkeit wäre, einen Vorratsbehälter mit Druckminderer und Nadelventil direkt an die Kammer anzuschließen und den Auslaß mit einem "Bubbler" zu versehen. Ein Bubbler ist ein im Normalfall mit Flüssigkeit gefüllter Behälter mit je einem Rohranschluß unten und oben. Das durchströmende Gas muß von unten gegen den statischen Druck der Flüssigkeit aufsteigen. Diese Lösung entfällt aus mehreren Gründen, von denen die wichtigsten genannt werden:

Der Auslaß für Abgas befindet sich auf dem Dach des H1-Gebäudes, das sind mehr als 30 Meter oberhalb der Detektoren. Der Kammerinnendruck müßte folglich so hoch sein, daß der Druck im Bubbler von typisch² einigen 100 Pa, der hydrostatische Druck durch die Höhendifferenz von größer 10 Pa und die Druckverluste durch die Rohrreibung von einigen kPa überwunden werden können (vergl. nachf. Unterkapitel). Abgesehen von den Druckschwankungen, die von den aufsteigenden Blasen in der Bubblerflüssigkeit ver-

1. Eine Übersicht über verschiedene Konzepte wird in [GGM85] gegeben
2. Der Druck einer 1 cm hohen Wassersäule beträgt etwa 100 Pa

ursacht werden, ist keiner dieser Drücke innerhalb der erlaubten Toleranzen der mechanisch sehr empfindlichen Kammern zulässig. Für die Jet-Kammern müßte eine Regelung des Flüssigkeitsniveaus im Bubbler je nach Umgebungsluftdruck variiert werden können. Der erreichbare Fluß durch die Kammern ließe sich ausschließlich über den Kammerinnendruck einstellen. Durch den Verzicht auf geschlossene Kreisläufe würde die erforderliche Langzeitstabilität der Gasmischungen aufgegeben werden müssen und die Ausgaben für die Beschaffung von Gasen würden extrem hoch. Weiterhin setzte sich in zunehmendem Maß die Meinung durch, daß durch Rückdiffusion der Bubblerflüssigkeit (meist Silikonöl) in die Kammern Alterungseffekte an deren Elektroden auftreten können.

Es ist folglich unumgänglich, zwei Druckpotentiale zum Gastransport vorzusehen. Bei den geringen oben genannten Drücken ist weder eine Druckmessung noch eine Regelung mit konventionellen Methoden zu erfüllen. Daher erscheint es verwunderlich, daß zur Druckregelung in den H1-Gassystemen einfache Magnetventile mit Rückstellfeder eingesetzt werden. Die Gründe hierfür sind die schnelle Reaktionszeit von einigen ms, der einfache, daher sichere und zuverlässige Aufbau und die definierte, durch eine Feder fest geschlossene Ventilposition im stromlosen Zustand. Andere Regelelemente, wie z.B. Massenflußregler, sind nach bisherigen Erfahrungen vergleichsweise langsamer, komplizierter und somit störanfälliger (vergl. Kap 5.2). Der Nachteil einer Steuerung mit Magnetventilen ist der diskontinuierliche Fluß. Dieser kann durch eine sorgfältige manuelle Voreinstellung der Kammerflüsse durch Nadelventile weitgehend minimiert werden.

6.2 Potentiale und Flüsse

Zunächst werden Aufbau und Funktion der wichtigsten Elemente zur Bereitstellung der Druckdifferenzen vorgestellt, die für die Hauptgasflüsse in den Gassystemen notwendig sind. Anschließend wird die grobe Flußkontrolle mittels Differenzdruckmesser diskutiert.

a) Druckreduzierer

Die Reduzierstationen sind industriell hergestellte Standardartikel, die im Normalfall den Anschluß von zwei Gasvorratsbehältern ermöglichen. Je nach Ausstattung können die Behälter manuell oder automatisch auf den Druckreduzierer umgeschaltet werden. Der Einstellbereich des Sekundärdruckes beträgt nach Industriestandard 0 bis 1 MPa (10 bar) über Umgebungsdruck. Die für den direkten Anschluß an die offenen Kreisläufe sinnvollen Überdrücke von 25 bis 50 kPa sind mit den vorhandenen Ventilen jedoch schlecht justierbar. Daher sind teilweise feinere Druckreduzierer im Gasraum 601 nachgeschaltet. Aus Sicherheitsgründen werden im Alarmfall an den Reduzierstationen die Leitungen zu den Gassystemen automatisch geschlossen.

b) Kreislaufpumpen

Die wichtigste Anforderung an die Kreislaufpumpen ist, den benötigten Unterdruck zum Rückfluß des Gases aus den Kammern zu erzeugen. In den geschlossenen Kreisläufen muß gleichzeitig das Potential von etwa 25 bis 80 kPa für den Vordruck geliefert werden können. Weiterhin sind ein möglichst zuverlässiger Betrieb, lange Wartungsintervalle und eine hohe Gasdichtigkeit erforderlich. In Gasversorgungsanlagen für Drift- und Proportio-

nalkammern werden hauptsächlich drei Pumpentypen als Kreislaufpumpe eingesetzt:

- Turbinen mit regelbarer Drehzahl
- Rotationspumpen mit Drehschiebern aus Karbon auf exzentrischer Achse
- Kompressoren, die mit auf- und abwärts bewegter Membrane zyklisch komprimieren

Turbinenpumpen werden bevorzugt verwendet, wenn kein Unterdruck in der Rückleitung der Kammer gewünscht wird und die Leistung kontinuierlich regelbar sein soll. Dieser Typ Pumpe kann daher nicht in den H1-Gassystemen eingesetzt werden.

Bei Rotationspumpen sind alle mit dem Gas in Berührung kommenden Teile in einem massiven gasdichten Behälter untergebracht. Die Kraftübertragung auf die Achse mit den Kohleschiebern erfolgt magnetisch, so daß diese Anordnung eine hohe Gasdichtigkeit aufweist. Ein weiterer Vorteil ist die gleichmäßige Gasförderung. Die wesentlichen Nachteile hierbei sind, daß diese Pumpen nur bei geringen Druckdifferenzen von einigen 10 kPa zwischen Saug- und Druckseite arbeiten können und ein nicht unerheblicher Abrieb entsteht. In diversen anderen Gasversorgungsanlagen [GÖT90, KRA90] hat sich gezeigt, daß Pumpen dieses Typs nach durchschnittlich einem Jahr reparaturbedürftig sind (Antrieb defekt).

Membranpumpen haben den Nachteil, im Normalfall nicht die Anforderung nach Gasdichtigkeit zu erfüllen. Industriell erhältlich sind jedoch Produkte mit einer Leckrate von $3,6 \cdot 10^{-6}$ NI/h, was den Anforderungen bei den H1-Gassystemen vollauf genügt. Wird die Pumpleistung nur zu einem geringen Prozentsatz in Anspruch genommen, so sind die durch die periodischen Kompressionsvorgänge verursachten Druckstöße vernachlässigbar klein. Auch bei diesem Pumpentyp wird in geringem Ausmaß Abrieb an der Membrane erzeugt, der durch mechanische Feinfilter aufgefangen werden kann. Diese Pumpen ermöglichen sowohl einen hohen Unterdruck auf der Saugseite ($-90 \text{ kPa}_{\text{rel.}}$) als auch einen großen Vordruck von bis zu $+400 \text{ kPa}_{\text{rel.}}$ an der Druckseite.

Die in früheren Testexperimenten aufgetretenen Undichtigkeiten an Pumpen diesen Typs wurden durch Risse im Gußkörper des Pumpenraumes verursacht. Durch den Einsatz von Edelstahl für den kompletten Pumpenkopf kann diese Ursache vermieden werden. Die Wartungsintervalle liegen in der Größenordnung von einem Jahr und beschränken sich auf einen Austausch der Fördermembrane. Da also zu letztgenanntem Pumpentyp durchweg positive Erfahrungen vorlagen, wurden in den H1-Gassystemen insgesamt 11 (+2 Reserve) Membrankompressoren eingebaut.

Die Anforderungen hinsichtlich Gasdichtigkeit und Fördermenge sind in den unterschiedlichen Kreisläufen verschieden. So sind in den geschlossenen Kreisläufen mit den großvolumigen Kammern beide Aspekte wichtiger einzustufen, als in den offenen Kreisläufen zur Versorgung der kleineren Kammern. Da in einem offenen Kreislauf das durch die Pumpe angesaugte und in die Abluftleitung gedrückte Gas nicht wiederverwendet wird, besteht bei Undichtigkeit der Pumpe keine Gefahr für die angeschlossene Kammer. Sehr wohl sind auch hier größere Leckraten zu vermeiden, da die meisten Kammergase mit Luft ein brennbares oder explosives Gemisch bilden (s. Anhang F). Die Pumpen in den geschlossenen Kreisläufen stellen ein viel höheres Sicherheitsrisiko dar. Schon durch kleinste Lecks im Unterdruckbereich der Anlage gelangt stetig Luft hinein, die sich mit dem Gas des Kreislaufes mischt und im Extremfall zu einem gefährlichen Gasgemisch im kompletten System führt.

Um die Ersatzteil-Lagerhaltung zu vereinfachen, wurden genau zwei unterschiedliche Typen von Membranpumpen [KNF01, KNF02] in den Gassystemen eingebaut. Beide Pumpen sind Einkopfmodelle mit einem komplett in Edelstahl ausgeführtem Gasraum, welcher an der Ein- und Auslaßseite durch Edelstahlplättchen als Ventil abgeschlossen wird. Die durch einen exzentrisch gelagerten Stößel vertikal bewegte Membrane war in der ersten Ausführung aus Viton¹. Die Pumpen haben eine typische Förderleistung von 28 NI/min ("kleine" Pumpe) bzw. 30 NI/min ("große" Pumpe). Die Leistung wurde bewußt überdimensioniert, damit nach Drosselung des Durchsatzes die zyklischen Druckstöße minimal werden. Um die Anforderung nach erhöhter Gasdichtigkeit zu erfüllen, ist die Bauweise der großen Pumpe [KNF01] insgesamt massiver. Das besondere bei dieser Pumpe ist eine zweite Membrane, die am selben Pleuel wie die Fördermembrane den variablen Gasraum der Pumpe nach außen abschließt. Sollte die Fördermembrane undicht werden, so wird deren Aufgabe von dieser zweiten "Sicherheits"-Membrane übernommen (Abb. 6.1, links). Zur Erfassung eines Membrandefektes ist an den Raum zwischen den Membranen ein elektrischer Differenzdruckmesser PTX-5 angeschlossen, der automatisch ausgelesen wird. Ohne Unterbrechung des normalen Pumpenbetriebes kann sowohl ein Helium- als auch ein Vakuumlecktest durchgeführt werden. Zusätzlich wird bei allen Pumpen die Leistung durch einen elektrischen Druckwandler PTX-4 und ein Manometer PGX-2 überwacht (Abb. 6.1, rechts). Nach den bisherigen Erfahrungen tritt ein Membrandefekt nicht plötzlich auf, sondern kündigt sich schon Tage vorher durch ein Nachlassen des Saugdruckes an. Der typische Unterdruck beträgt je nach Pumpleistung etwa -75 bis -95 kPa_{rel.}. Im Laufe der Zeit waren bei den kleinen Pumpen die Membranstandzeiten auf nur wenige Monate abgesunken. Versuchsweise wurden Neopren²-Membra-

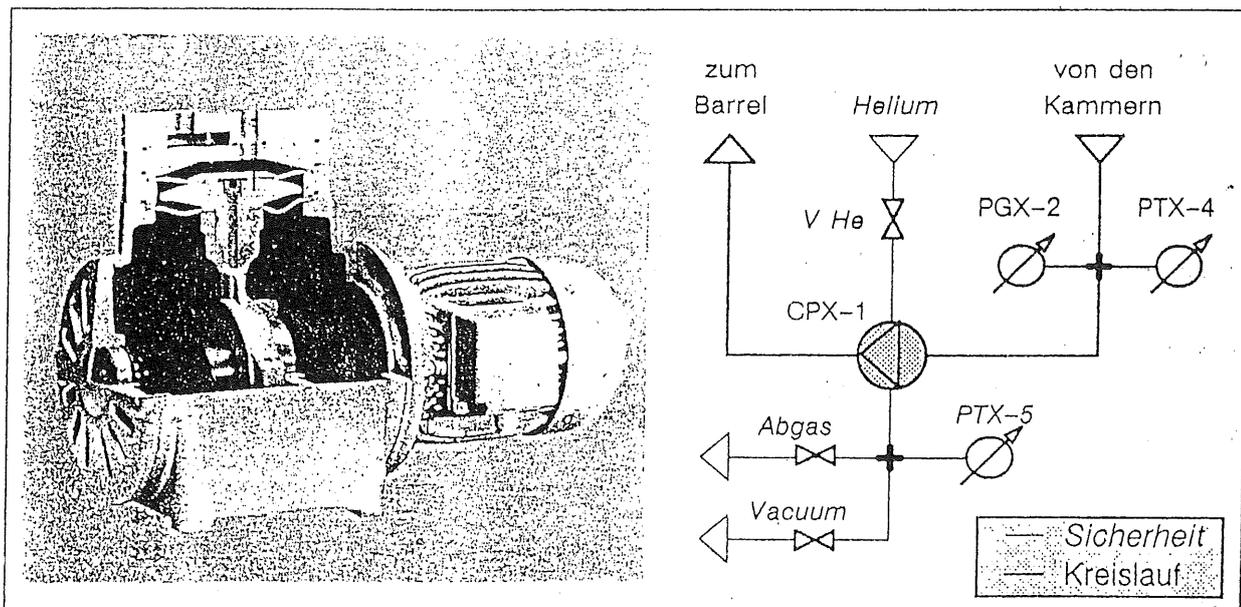


Abb. 6.1: Schnittbild der Doppelmembranpumpe (links, aus [KNF01]) und Verschaltung in einem geschlossenen Kreislauf der H1-Gassysteme (rechts, vergl. Anhang E)

1. Viton = Handelsname für einen Fluor-Kautschuk
2. Neopren = Handelsname für einen Chloropren-Kautschuk

nen eingesetzt, die sich ähnlich wie Viton beständig und inert gegenüber den verwendeten Gasen verhalten [MER91]. Hierdurch konnten die Wartungsintervalle bei den kleinen Pumpen auf über ein Jahr verlängert werden.

Im praktischen Betrieb erreichen die Pumpen den maximal möglichen Unterdruck bei geschlossenem Ventil an der Saugseite. Dieser Druck bleibt absolut gesehen immer konstant und ist nicht vom Umgebungsdruck abhängig. In den H1-Gassystemen wird der Saugdruck jedoch relativ zum Umgebungsdruck gemessen (Abb. 6.2). Daher steigen/fallen die abgebildeten Meßwerte synchron zum fallenden/steigenden Luftdruck (vergl. hierzu Abb. 6.5, z.B.: Tag 650 ff). Wegen der hohen Flußrate von typisch 6 l/min zum parallelen Betrieb beider CJC's, ist der Unterschied im Saugdruck zwischen offenem und geschlossenem Ventil zur Kammer deutlich größer als bei der kleinsten angeschlossenen Kammer (CIZ; typ. Fluß: 0,1 l/min).

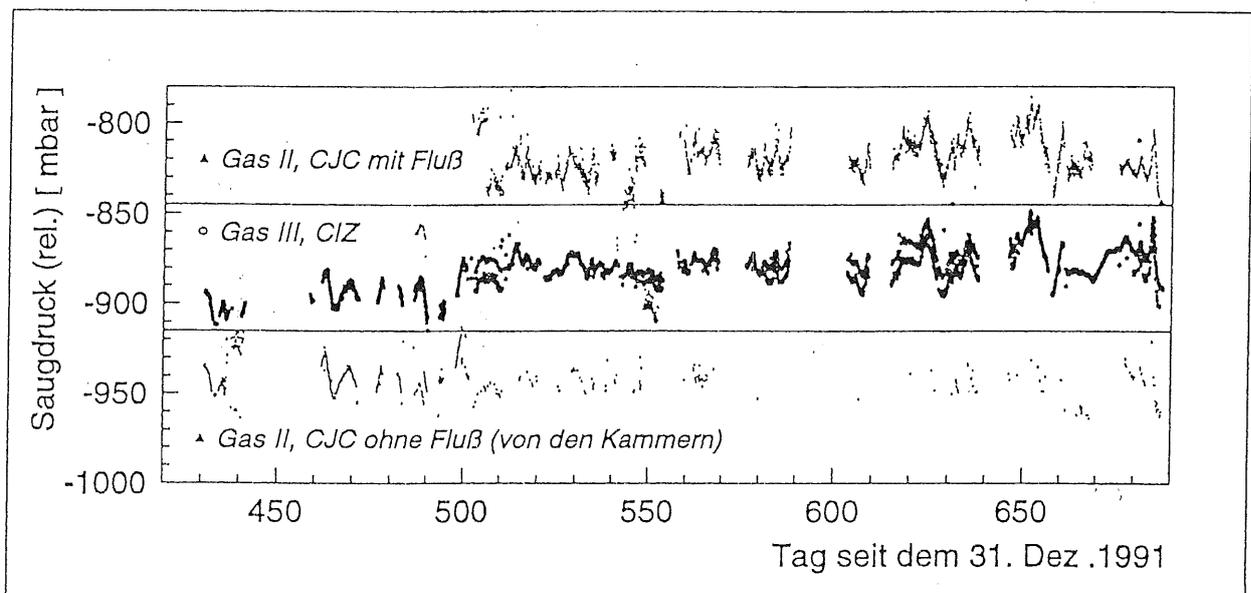


Abb. 6.2: Saugpotentiale der Kreislaufpumpen der größten (CJC) und der kleinsten (CIZ) H1-Spurenkammer im Betriebsjahr 1993

c) Vordruck

Für die Versorgung mit Gas aus den oberirdisch gelagerten Gasvorräten ist der Druck im Einlaß der Gasracks in Raum 601 gleich dem Druck der oben erwähnten Druckminderer. Zur Sicherheit vor erhöhtem Druck und Fluß sind in allen Kreisläufen folgende Teile vorgesehen (vergl. Anhang E):

Erstes Bauteil des Einlasses ist ein Schwebekörper-Durchflußmesser mit Nadelventil [PORF1]. Der Durchmesser des Meßrohres sowie das Material des Schwebekörpers (Kugel) sind dem Gasverbrauch der entsprechenden Kammern angepaßt und ermöglichen eine optische Kontrolle des Gasflusses. Mit dem Nadelventil wird der Durchfluß auf die nötige Menge begrenzt und zusätzlich der Vordruck je nach Flußrate reduziert. Es schließt sich ein Ventil zur Spülung der Versorgungsleitung an, welches bei längerem Nichtgebrauch der Leitung oder Gasartwechsel benutzt wird. Zum Schutz vor Überdruck im nachfolgenden Kreislauf ist ein Sicherheitsventil [NUPCA] mit einem Öffnungsdruck von ca. 160 kPa_{abs.} (= 1,6 bar_{abs.}) installiert. Unabhängig davon wird der Systemdruck von einem

elektrischen Druckaufnehmer automatisch überwacht. Im Fall von Überdruck oder bei einem Alarmzustand des Gassystems werden alle Magnetventile geschlossen, so daß auch der Gasfluß in die Kreisläufe unterbrochen wird. Bei den offenen Kreisläufen des Gassystems III wird zusätzlich der Gasfluß durch die elektronischen Massenflußregler begrenzt und automatisch überwacht (vergl. Kap.5.2).

Die Druckreduktion durch Leitungswiderstände, Engstellen an Ventilen und Verbindern sowie sonstige Geräte und Filter beträgt typisch einige hPa und ist gegenüber einem Vordruck von 25 bis 80 kPa zu vernachlässigen. Der Vordruck im Hauptteil des Gassystems wird erst an den Nadelventilen der Flußmesser reduziert, an welche die langen Versorgungsleitungen zum Verteilerrack angeschlossen sind (vergl. d). Die geschlossenen Kreisläufe sind im Normalfall von der Frischgasversorgung abgetrennt. Der Systemvordruck ist im wesentlichen identisch mit dem Druck im Puffervolumen ("barrel"). Dieser Druck ist von der Temperatur des Gases im System sowie der Temperatur innerhalb des Detektors, dem Luftdruck und der Stellung der Magnetventile zur Kammerdruckregelung abhängig. Unter der Annahme, daß sich die Kammergase wie ideale Gase verhalten, dehnt sich das Gas etwa um 1% des Volumens pro 3°C Temperaturerhöhung aus.

Aufgrund der guten Funktionsweise der Klimaanlage im H1-Gebäude blieb die mittlere Raumtemperatur mit $24,0^{\circ}\text{C} \pm 0,6^{\circ}\text{C}$ weitgehend konstant (Abb. 6.3). Die Auswirkungen auf den Vordruck können daher vernachlässigt werden.

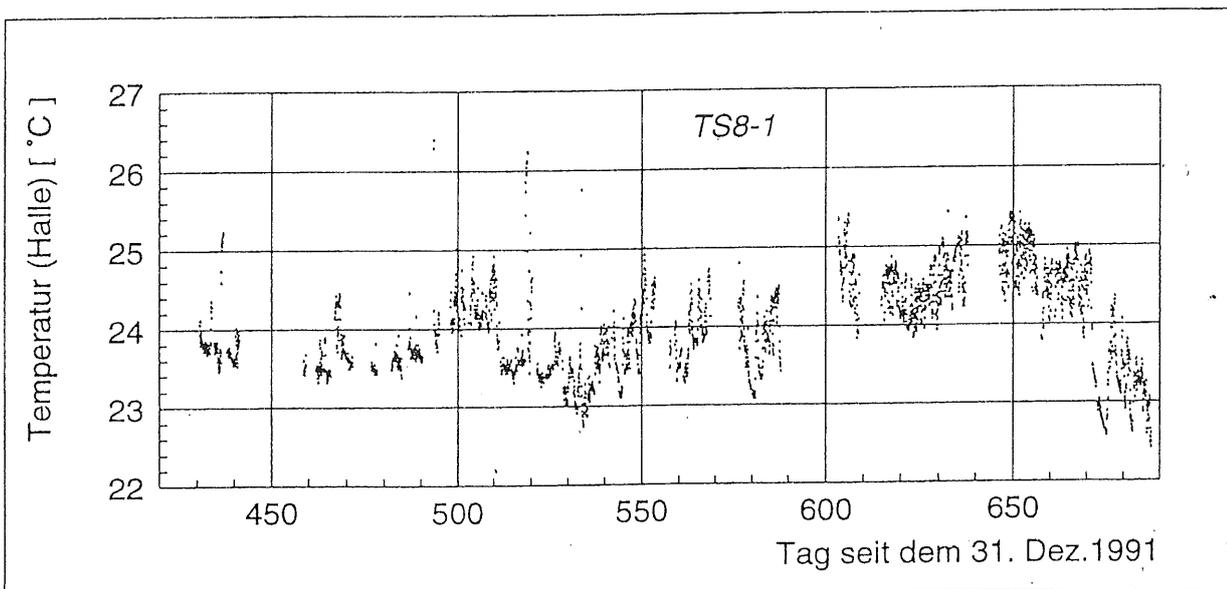


Abb. 6.3: Temperatur in der H1-Experimentierhalle, Runperiode 1993

Ähnlich konstant blieb im Normalfall auch die Detektortemperatur, wobei der Mittelwert aus allen Sensoren $TS0-X$ bei einem Wert von $30,0^{\circ}\text{C} \pm 1,6^{\circ}\text{C}$ lag. Als Beispiel ist in Abb. 6.4 (oben) der zeitliche Verlauf der in den Planaren gemessenen Temperatur dargestellt. Die Temperatur des Gases in den anderen Kammern ist nahezu identisch. Die Abweichungen von der mittleren Temperatur zu niedrigen Werten wurden durch Ein- oder Ausschalten der Elektronik (z.B.: Vorverstärker) verursacht, die direkt an den Kammern untergebracht ist. So stieg nach dem Einschalten der Elektronik (Tag 486) die Temperatur

innerhalb eines Tages exponentialförmig von $21,3^{\circ}\text{C}$ auf $29,5^{\circ}\text{C}$ an. Analog ergibt sich ein fallender Temperaturverlauf beim Ausschalten. Eine weitere Störung war der Ausfall der Detektorkühlung am 21.09.93 (Tag 630). Die Kammertemperatur erhöhte sich innerhalb von 12 Stunden von etwa 30°C auf über 52°C (Abb. 6.4, unten).

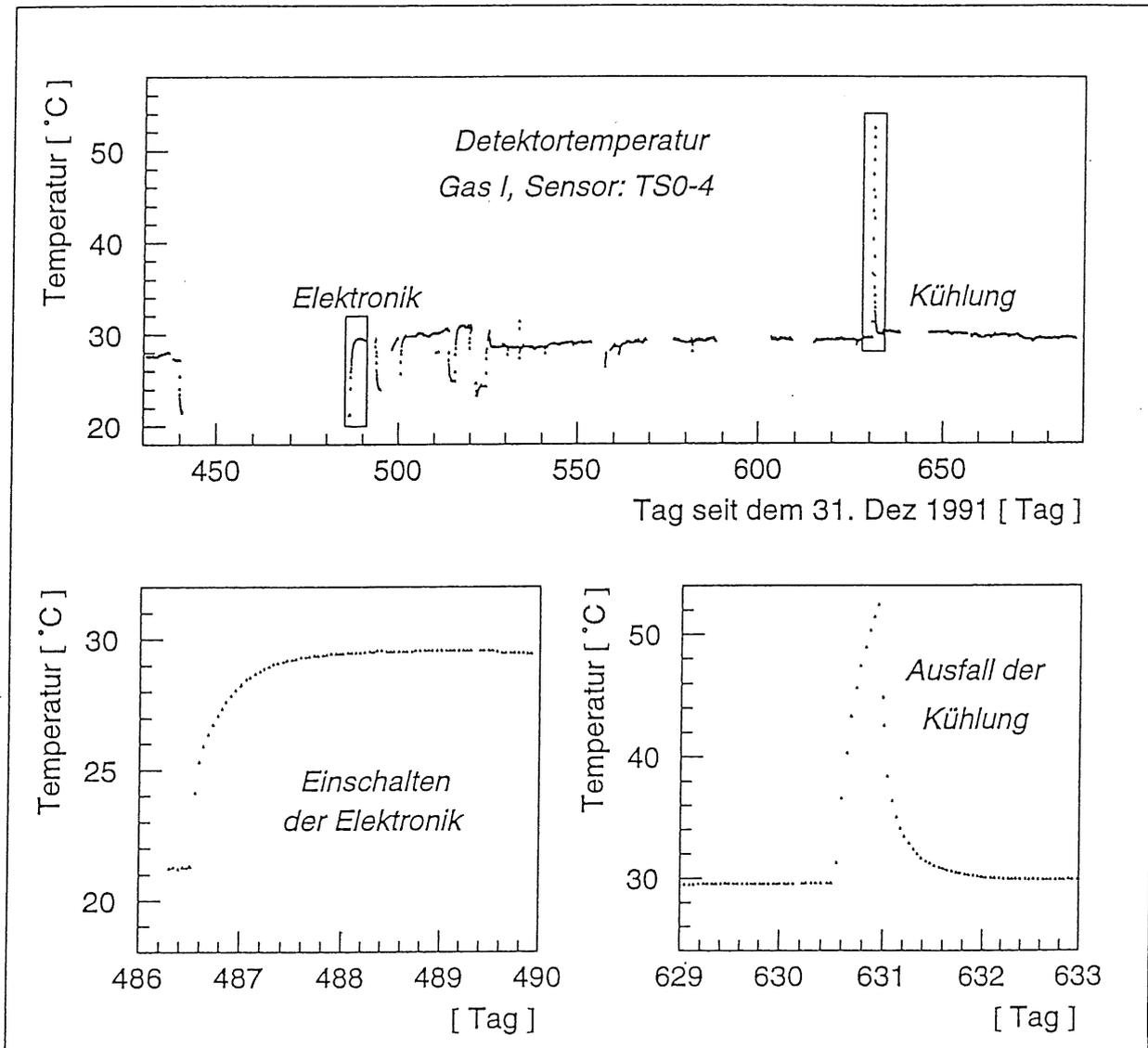


Abb. 6.4: Temperaturverlauf in den Planaren, Runperiode 1993

Da der Druck in den Kammern innerhalb enger Grenzen geregelt wird, muß eine der Expansion des Gases in den Kammern entsprechende Gasmenge ins System abgeführt werden. In den geschlossenen Kreisläufen wird dadurch der Systemvordruck proportional zum Volumenverhältnis der Kammern zum restlichen Gaskreislauf erhöht. Die größten Änderungen ergeben sich, wenn CJC1 und CJC2 gemeinsam von einem Kreislauf versorgt werden. Diese Kammern haben ein Normvolumen von zusammen über 4.000 NI und das Volumen im Hauptteil des Gassystems beträgt weniger als 100 NI. Die Temperaturerhöhungen von etwa $8,2^{\circ}\text{C}$ (Elektronik) bzw. 22°C (Ausfall der Kühlung) entsprechen einer abzuführenden Gasmenge von etwa 110 / 290 NI und führen zu einer Erhöhung des Systemvordrucks um ca. 110 / 290 kPa. In den beiden anderen geschlossenen Kreis-

läufen (F–MWPC/Planare, Radiale) sind die Druckerhöhungen im Barrel um den Faktor 4–5 geringer, da die Kammervolumina um diesen Faktor kleiner sind. Bei solchen Druckerhöhungen wird mit dem Druckmesser am Barrel automatisch ein Alarm im Gassystem erzeugt. Dadurch wird zunächst die Gasversorgung gestoppt und die Kammern werden bei Erreichen der Superalarmgrenze des Kammerinnendrucks belüftet.

Die Schwankungen des Luftdrucks ändern den Kammerdruck mit etwa 1% pro 1 kPa. Die bei Luftdruckerhöhung/–erniedrigung zu/von den Kammern zu befördernde Gasmenge erniedrigt/erhöht den Vordruck im Gassystem. In Hamburg betragen die Luftdruckschwankungen in Extremfällen ± 500 Pa/h und können mit einer Rate von ± 200 Pa/h zwischen 6 und 20 Stunden lang andauern [KES91]. In letzterem Fall (40 hPa) betrüge die in der CJC1 und CJC2 gemeinsam zu-/abzuführende Gasmenge 160 NI, die einer Druckdifferenz von etwa 160 kPa im Barrel entsprechen. In der Runperiode 1993 wurden mehrmals Änderungen von 62,5 Pa/h (=0,625 mbar/h) über 1,6 Tage gemessen und der längste Druckanstieg ab Tag 653 (14.10.1993) dauerte 4,3 Tage und betrug insgesamt 50 hPa (Abb. 6.5).

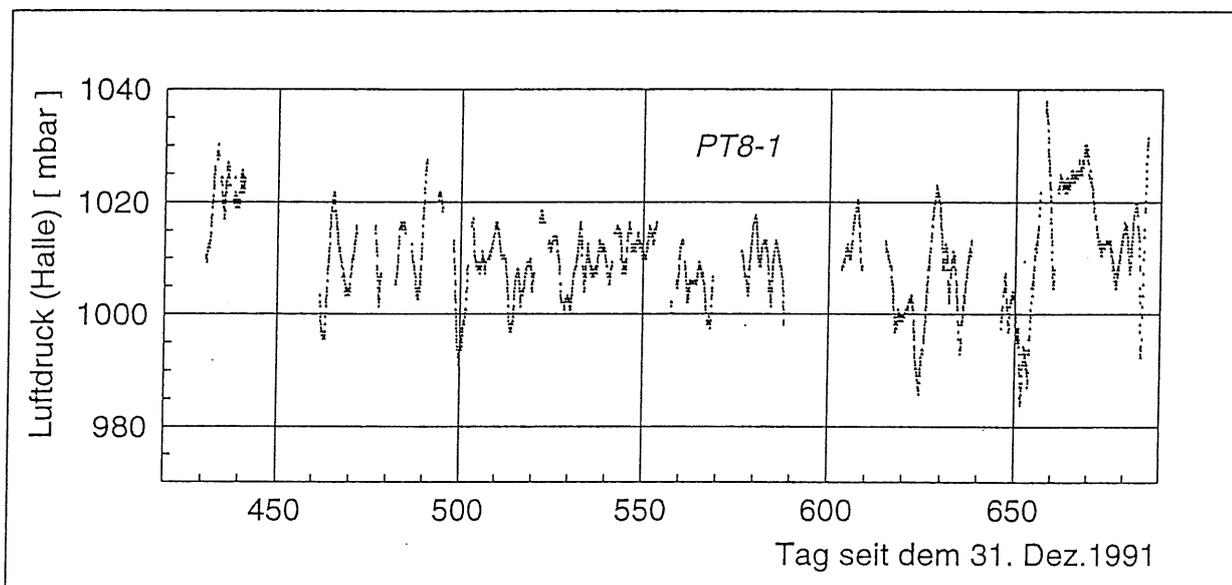


Abb. 6.5: Luftdruck in der H1-Experimentierhalle, Runperiode 1993

Ebenso wird der Barreldruck beim Schalten der Magnetventile zur Ver- und Entsorgung der Kammern geändert. Druckänderungen im Bereich von bis zu 20 kPa lassen sich jedoch nur bei Gassystem II messen, wenn beide Kammern gemeinsam von einem Kreislauf versorgt werden und minutenlang eines der beiden erwähnten Ventile geschlossen ist.

Die großen Druckschwankungen im Barrel des Gassystems II lassen sich nicht mit dem kleinen Systemvolumen (-100 NI) auffangen. Daher wurden in der Anfangszeit zwei weitere, gleichgroße Behälter in Serie zum vorhandenen Barrel geschaltet (+160 NI). In 1992 wurde diese Schaltung durch eine automatische Regulierung des Barreldrucks in allen geschlossenen Kreisläufen ersetzt. Die Meßgröße wird von dem elektrischen Druckwandler *PT1–3* geliefert und bei Über- bzw. Unterschreiten der Grenzwerte wird über das Magnetventil *SVX–5* Gas abgelassen oder über *SVX–1* nachgefüllt. Um die Ursache, die

zu einem solchen Vorgang führt, auch nachträglich noch bestätigen zu können, werden bei jeder Aktivierung Datum, Uhrzeit, Anfangsdruck, Enddruck, Umgebungsluftdruck und Temperatur automatisch vom "Logprinter" ausgedruckt³. Ein weiterer Grund für diese Regelautomatik ist die Gewährleistung eines konstanten Vordrucks in definierten Grenzen, was sich sowohl auf die Flußkonstanz zu/von den Kammern als auch auf einen stabilen Additivgehalt positiv auswirkt (vergl. Kap 5.4 und Abb. 5.11). Zusätzlich gibt es eine Variante dieser Regulierung, die in definierten zeitlichen Abständen einen partiellen Gasaustausch ermöglicht. Letztere wurde notwendig, um die Stickstoffkonzentration in den Vorkammern niedrig zu halten. Infolge von Lecks an diesen Kammern nahm der Stickstoffanteil um etwa 1Vol%/Tag zu, der mit Hilfe der Barrelautomatik durch Austausch von etwa 100l Kammergas unter einem Prozent gehalten werden konnte.

d) Leitungen und Flußwiderstände

Wie in der Ansicht Abb. 4.2 dargestellt, gibt es eine Vielzahl von Gasleitungen zwischen den verschiedenen Orten im H1-Gebäude (vergl. auch Anhang E). Sie dienen dazu, die verschiedenen Teile der Gassysteme untereinander und das Gassystem mit den Kammern im Detektor zu verbinden. Wegen der großen Anzahl von Leitungen sollten deren Durchmesser aus platztechnischen Gründen möglichst klein sein. Lange, dünne Rohre haben aber den Nachteil, daß zur Förderung derselben Gasmenge ein höherer Druckverlust in Kauf genommen werden muß.

Bei den Ver- und Entsorgungsrohren von den Gasräumen 701, 727 und den Kryobehältern im Freien zum Gasraum 601 stellt ein Druckabfall kein Problem dar. Diese ca. 7 bis 40 m langen Leitungen sind in Edelstahl mit einem Innendurchmesser von ca. 6 oder 13 mm (-8/15 mm außen) ausschließlich im Freien oder innerhalb der Gasräume verlegt.

Die über 100 Meter langen Leitungen vom Hauptteil der Gassysteme in Raum 601 bis zu den Kammern sowie die gleichlangen Rückleitungen müssen genauer betrachtet werden. Eine hohe Druckdifferenz in diesen Leitungen ist wegen des direkten Anschlusses an die mechanisch empfindlichen Kammern nicht wünschenswert. Weiterhin sollte aus sicherheitstechnischen Gründen der Druck maximal 10 kPa betragen, da diese Leitungen durch alle Stockwerke hindurch in die Experimentierhalle, dort bis auf das Dach des Elektronikwagens und weiter in den Detektor hinein führen und somit ein großes Gefahrenpotential darstellen. Hier galt es einen vernünftigen Kompromiß zwischen einem möglichst kleinen Rohrdurchmesser und einem akzeptablen Druckverlust zu finden. Daher wurden im Vorfeld die Rohrreibungsverluste in Leitungen mit verschiedenem Querschnitt für die erforderlichen Gasflüsse grob berechnet. Hierzu wurde das Gesetz von Hagen und Poiseuille verwendet, welches unter Vernachlässigung der Kompressibilität auch für laminare Gasströmungen in glatten Rohren gilt.

$$\Delta p = \frac{V}{\Delta t} \frac{8 \eta l}{\pi r^4} \quad \text{mit :} \quad \begin{array}{l} v/\Delta t = \text{Volumendurchfluß} \\ \eta = \text{dynamische Viskosität} \\ l = \text{Länge des Rohres} \\ r = \text{Innenradius des Rohres} \end{array}$$

In Abb. 6.6 ist für verschiedene konventionelle Rohrdurchmesser der Druckverlust pro

3. eine detaillierte Beschreibung des Programms befindet sich in [HAN92]

Meter Leitungslänge über dem Durchfluß aufgetragen. Um die unterschiedliche Viskosität der in den H1-Gassystemen zu verwendenden Gase zu berücksichtigen sind pro Rohrrinnenradius zwei Geraden eingetragen. Die durchgezogene Linie ist mit der dynamischen Viskosität für Argon ($\eta = 2,22 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) und die gestrichelte Linie mit der Viskosität für Propan ($\eta = 8,0 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; s. Anhang F) bei einer Temperatur von 20°C berechnet⁴.

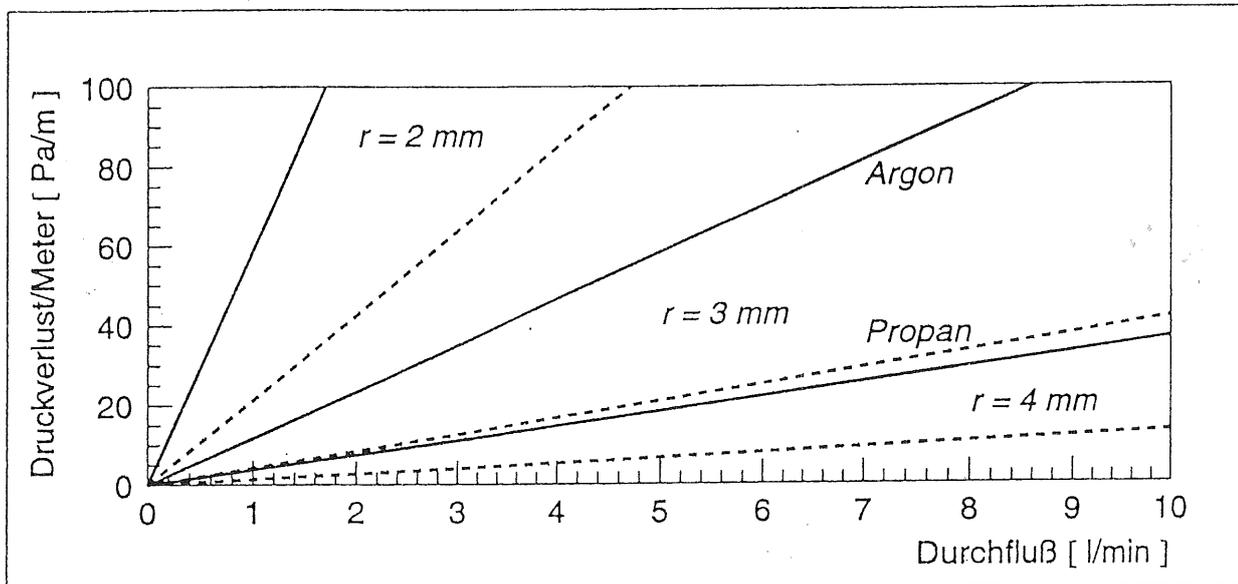


Abb. 6.6: Abschätzung des Druckverlustes durch Rohrreibung

Die größte benötigte Flußrate beträgt in Gassystem I: 2,5 l/min für F-MWPCs/Planare, in Gassystem II: 8,6 l/min für CJC2 und in Gassystem III: 0,67 l/min für die COZ (Zahlen aus Tab. 4.1). Zur groben Abschätzung der zusätzlichen Druckverluste durch gebogene Rohrabschnitte, Verbinder und Ventile sind Leitungslängen von 150 m statt der geplanten 100 m anzusetzen.

Es wurde beschlossen, für die Gassysteme I und II durchgängig Kupferrohre mit einem Innendurchmesser von 8 mm zu verwenden und sämtliche Leitungen in Gassystem III in 4 mm Innendurchmesser auszulegen. Die Wandstärke der Rohre beträgt 1 mm und die Härte des Materials ist auf die verwendeten Schneidringe der Rohrverbinder abgestimmt. Die Reinheit der gasführenden Oberfläche entspricht dem Standard, der für den Einsatz in Klimaanlage und Kälteanlagen vorgeschrieben ist.

Innerhalb der Racks der Gassysteme sind Rohre mit den oben angegebenen Durchmessern konsequent verwendet worden. Wie bei Experimenten üblich, unterscheidet sich jedoch die zur Zeit existierende Verrohrung der Verbindungsstrecken von der geplanten. Der erste Leitungsabschnitt ist die Strecke vom Gasraum 601 bis zu der Verteilerstation auf dem Dach des Elektronikhängers. Hier existiert pro Kreislauf eine Hin- und eine Rückleitung. Dieser Abschnitt ist in insgesamt drei Bereiche unterteilt, in denen sich die Rohre in Länge, Material und Durchmesser unterscheiden (Tab. 6.1). Die Rohre im ersten Bereich (Raum 601) wurden wie geplant in Kupferrohr ausgeführt. Die Leitungen durch den Schacht bis zum Hallenboden bestehen aus Edelstahlrohr (SS). Von dort bis zum Verteilerrack bestehen die Verbindungen aus flexiblen Edelstahl-Ringwellschläuchen mit

4. zur technischen Berechnung von Leitungen (bes. Ringwellschläuche) siehe [HYD83]

Armierung. Diese Ausführung hat sich in der Praxis gut bewährt, da die Leitungen schon mehrmals neu verlegt werden mußten. Hierbei und beim Verfahren des gesamten Detektors konnte das Gasleitungssystem geschlossen bleiben.

Ort	Leitungen von <-> nach	Material	Länge [m]	I-Radius [mm] / Anzahl		
				Gas I	Gas II	Gas III
R. 601	Gasrack <-> Schacht	Kupferrohr	-7...11	4 / 8	4 / 4	2 / 10
Schacht	6. <-> 1. Stock	SS-Rohr	30	3 / 8	5 / 4	2 / 10
Halle	Schacht <-> Trailer	SS-Wellschlauch	41	5 / 8	6 / 4	3 / 10
	Trailer <-> CDA	SS-Wellschlauch	19	3 / 27	3 / 6	3 / 15
	CDA <-> Kammern	Aluminiumrohr	-3...7	3 / 27	3 / 6	3 / 15

Tab. 6.1: Parameter der Verbindungsleitungen von Raum 601 bis zum Detektor

Der letzte Abschnitt ist die Verbindung von der Verteilerstation zu den einzelnen Kammern im Detektor. Pro Kammer sind eine Hin-, eine Rück- und eine Druckmeßleitung installiert. Wegen der hohen Flußrate und des kleinen Rohrradius sind die Versorgungsleitungen für die CJC2 doppelt ausgelegt. Die erste Strecke, vom Verteiler bis zum zentralen Anschlußbereich "CDA" hinter dem rückwärtigen Kalorimeter, besteht aus flexiblen Edelstahl-Ringwellschläuchen. Mit Nylonverbindern wird an dieser Stelle das Leitungssystem galvanisch vom Detektor getrennt. Für die letzte Strecke bis zu den Kammern wurden nicht-magnetische Aluminiumrohre verwendet. Ebenso wie die Kupferrohre wurden auch alle anderen Leitungen von den Herstellern mit Lösungsmitteln von Fettrückständen befreit und anschließend mit Heißdampf nachgereinigt. Nach Installation der Verrohrung und vor dem Anschluß der Kammern wurden alle Leitungen mit Inertgas gründlich gespült und auf Gasdichtigkeit geprüft. Die gesamte Länge der Rohrleitungen vom Hauptteil des Gassystems in Raum 601 bis zu den Kammern beträgt etwa 104 bis 122 Meter. Hierbei sind neben den Rohrlängen aus Tab. 6.1 zusätzlich die Leitungen innerhalb der Verteilerstationen berücksichtigt.

e) Flußmesser

Zur sicherheitsrelevanten Bilanzierung der Gasflüsse zu und von den Kammern sind in Gassystem III in allen fünf Kreisläufen Massenflußregler/-messer installiert (vergl. Kap. 5.2). In den beiden anderen Gassystemen befinden sich in diesen Leitungen elektrische Differenzdruckmesser [VDW01]. Der gemessene Über-/Unterdruck in diesen Leitungen ist dem Gasfluß proportional. Als Beispiel ist in Abb. 6.7 der im Stundentakt gemessene Differenzdruck in der Zuleitung zu den F-MWPCs/Planaren *FM1-1* sowie die Druckdifferenz *FM1-2* in der Rückleitung dieser Kammern abgebildet. Ab etwa Tag 532 (15.06.93) wurde der normale Kammerbetrieb wieder aufgenommen. In beiden Meßdaten bedeuten Werte um 0 mbar, daß das entsprechende Ventil zu diesem Zeitpunkt geschlossen war. Proportional zur Voreinstellung der mechanischen Flußmesser zeigen die Differenzdrücke den momentanen Fluß in den Leitungen an. Durch einen Rahmen hervorgehoben ist eine nicht optimale Voreinstellung der Flußmesser. Hier ist der Fluß zur Kammer deutlich höher eingestellt als der Fluß von der Kammer. Daher war in diesem Zeitraum das Auslaßventil

immer geöffnet (Meßwerte < 0 mbar), während das Einlaßventil häufig geschlossen war. Im weiteren Verlauf ist eine bessere Voreinstellung der Flüsse zu sehen.

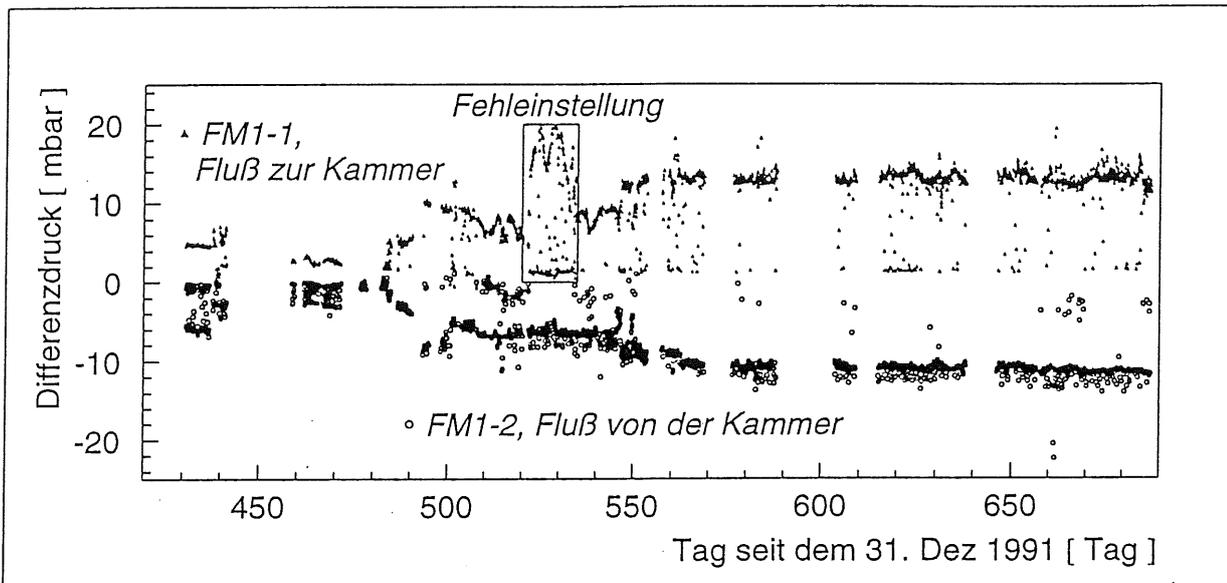


Abb. 6.7: Flußmessung in der Leitung zu und von den F-MWPCs/Planaren (1993)

Versuche zur Bilanzierung der Gasflüsse aus gemessenen Druckdaten wurden in Hamburg erfolgreich durchgeführt. Hierzu mußten jedoch die Meßwerte im Gegensatz zu Abb. 6.7 kontinuierlich ausgelesen werden, um alle Schaltvorgänge der Ventile zu berücksichtigen. Ein Programm zur automatischen Flußbilanzierung wurde jedoch noch nicht installiert, da die Ergebnisse relativ grob im Vergleich zu anderen Verfahren der Leckkontrolle sind (vergl. Kap. 6.4).

6.3 Kammerdruck

Zunächst werden Aufbau und Funktion der Anordnung zur Messung des Kammerinnen-drucks, Installationen zur Not-Belüftung der Kammern und die Verschaltung zur Flußauf-teilung von den Kreisläufen auf die einzelnen Kammern vorgestellt. Abschließend werden die Druckverhältnisse im Detektor genauer behandelt.

a) Druckmessung in Detektornähe

Beim Zusammenbau und Test zum kompletten Spurkammersystem zeigte sich, daß die mechanische Stabilität der Kammern des Zentraldetektors zu optimistisch berechnet wurde. Zum Schutz vor mechanischen Schäden an den Kammern mußten die Anforderungen an die Druckregulierung neu definiert werden.

Statt einer Absolutdruckregulierung sollte nun der Druck in den zentralen Jetkammern mit einer Toleranz von ± 50 Pa relativ zum Umgebungsdruck geregelt werden. Die maximal zulässige Abweichung vom Luftdruck wurde auf ± 1 kPa festgelegt. Außerdem sollte mit einer um den Faktor 10 feineren Regeltoleranz als ursprünglich vorgesehen der Innendruck der kleinen Zentralkammern CIZ, COZ, CIP, COP und der B-MWPC relativ zum Außendruck geregelt werden ($p_{\max.} = 100$ Pa). Diese Maßnahme bewirkt eine deutliche

Verbesserung der Meßeigenschaften der drei Proportionalkammern. Bezogen auf den kleinen Abstand der Kathoden, verursachen hier kleine Druckschwankungen relativ große mechanische Verformungen, wodurch die Gasverstärkung stark beeinträchtigt wird. Der Meßbereich der elektrischen Manometer zur Messung des Kammerinnendrucks ist identisch mit der maximal zulässigen Druckdifferenz (± 100 Pa bzw. ± 1 kPa) zwischen Kammern und Umgebung. Für die Regelung ist eine Einteilung der Meßspanne in 0,1 bzw. 1 Pa Schritte sinnvoll.

Alle zur Messung des Kammerdrucks verwendeten Differenzdruckwandler sind vom selben Typ [MK223]. Aufbau und Funktionsweise dieses Sensortyps sowie der Drucksensoren zur Bestimmung des absoluten Umgebungsdruckes [MK122] werden anhand der Abb. 6.8 erklärt. Das gasdichte Metallgehäuse der Sensoren ist in zwei Volumen unterteilt. Im Meßvolumen dient die metallische Trennwand als Halterung für eine Keramikscheibe mit aufgedampften ringförmigen Elektroden aus Palladium. Diese bilden zusammen mit der in Richtung des zu messenden Druckes sich verformenden Membrane zwei Kondensatoren. Die druckabhängige Änderung des Kapazitätsverhältnisses wird gemessen. Bei Differenzdruckmessern ist die zweite Seite des Sensors offen, während sie zur Messung des Absolutdruckes unter Vakuum steht und verschlossen ist. Zur Aufrechterhaltung des Vakuums ist in diesem Raum ein chemischer Getter untergebracht.

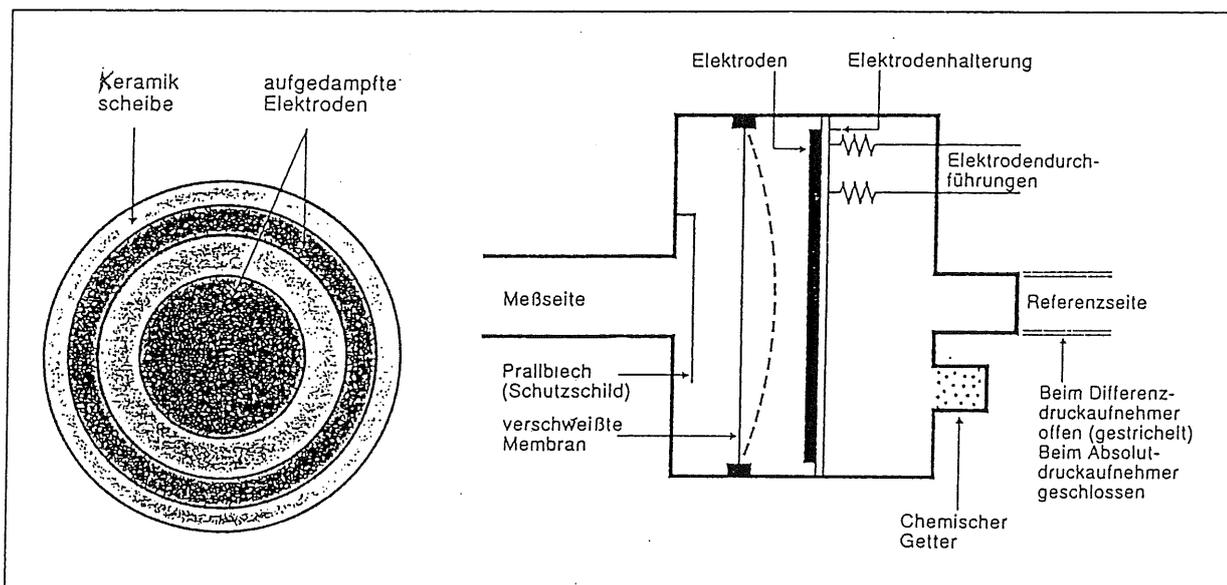


Abb. 6.8: Schema Drucksensoren "Baratron", aus [MKBAR]

Die Auflösung des Sensors wird im wesentlichen durch die gerade noch meßbare Kapazitätsänderung ($\sim 10^{-5}$ pF) bestimmt, die einer mechanischen Auslenkung der Membrane von etwa 10^{-10} m entspricht. Bei den Sensoren mit ± 100 Pa Vollausschlag ergibt sich theoretisch eine Auflösung von 10^{-4} Pa. Die Genauigkeit beträgt laut Hersteller 0,3% vom Endwert (Linearität, Hysterese und Reproduzierbarkeit). Wegen des unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der Sensormaterialien ist der Temperaturfehler mit 0,05% v.E. pro $^{\circ}\text{C}$ getrennt aufgeführt. Bei präziseren Meßgeräten wird die höhere Genauigkeit im wesentlichen durch eine sehr konstante Temperatur des kompletten Meßsystems er-

reicht. Solche Geräte, die auf Wunsch mit Eichzertifikat der PTB⁵ geliefert werden, sind jedoch um mehr als einen Faktor 10 teurer. Die Genauigkeit der "einfachen" Version ist für die Anwendung in den H1-Gassystemen voll ausreichend. Die Meßwerte sind Gleichspannungen im Bereich von -1 bis +1V und werden über 150 m lange Kabel in den Raum 601 übertragen, wo sie im 256 Hz Takt mit einer Auflösung von 12 Bit digitalisiert werden (Auflösung < 0,05 Pa). Für die Kammerdruckregulierung wird der gleitende Mittelwert der letzten acht Messungen gebildet. In diesem Aufbau besteht die Schwierigkeit darin, den Nullpunkt der Druckmesser stabil zu halten. Bei einer Überprüfung aller Druckwandler nach ca. 3 Jahren ununterbrochener Laufzeit zeigte sich, daß der Nullpunkt im Mittel nur um 3% des Endwertes verschoben war [STR94].

Wie sind diese Druckwandler nun mit den Kammern verbunden ?

Günstig für eine schnelle und genaue Erfassung des Kammerinnendruckes wäre eine kurze, separate Gasleitung direkt an der Kammer. Wegen des hohen Magnetfeldes im Bereich der Kammern und des fehlenden Platzes im Detektorvolumen müssen die Druckmeßgeräte weiter entfernt auf dem Dach des Elektronik Trailers untergebracht werden. So ist jede einzelne der 14 Kammern über eine separate Leitung (Abmessungen s. Tab. 6.1) mit einem eigenen Druckwandler *PT0-X* direkt verbunden. An diese Leitung ist exakt zwei Meter höher ein weiterer Druckwandler desselben Typs angeschlossen. Bei den Kammern in Gassystem I, die von einem gemeinsamen Kreislauf versorgt werden, sind die entsprechenden Leitungen auf einen gemeinsamen Druckmesser zusammengeschaltet (vergl. Abb. E7). Die insgesamt 11 oberen Druckwandler *PTX-1* liefern den Istwert für die Kammerdruckregulierung der 11 separaten Kreisläufe. Diese doppelte Messung des Kammerinnendruckes dient der Sicherheit, da bei Störung oder Totalausfall eines Druckwandlers der Druck mit dem zweiten, unabhängigen Gerät überwacht wird. Weiterhin kann aus den beiden Meßwerten grob die Dichte des Kammergases bestimmt werden (vergl. Kap.8.2). Damit die Druckmessung nicht durch eine vom Kammergas abweichende Gasdichte verfälscht wird, sollte das Gas in der Druckmeßleitung mit dem aktuellen Kammergas identisch sein. Um einen kleinen Gasfluß in der Leitung zu ermöglichen ist sie über einen Flußmesser mit Nadelventil mit der Rückleitung der Kammer verbunden. Die maximal mögliche Durchflußrate ist sehr gering (< 0,01 l/min) gehalten, da schon ein kleiner Fluß einen im Vergleich zur Meßgenauigkeit der Druckwandler großen Unterdruck erzeugt.

Zur Bestimmung der absoluten Gasmenge im Detektor müssen zusätzlich der Absolutdruck sowie die Temperatur am Ort des Druckwandlers und die Temperatur in den Kammern gemessen werden. Pro Gassystem sind neun PT100-Temperatursensoren *TS0-1* ... *TS0-9* in den Kammern sowie ein Temperatursensor *TS8-1* im Trailerrack installiert (Meßwerte siehe Abb. 6.4, Abb. 6.3). Die Messung des Absolutdruckes (s. Abb. 6.5) erfolgt mit dem Druckwandler *PT8-1* des Typs [MK122]. Die vom Hersteller angegebene Genauigkeit beträgt 0,5% vom Endwert (1000 Torr - 1,3 MPa) mit einem Temperaturfehler von $\pm 0,04\%$ des Meßwertes pro °C. Diese Luftdruckmesser der drei Gassysteme wurden in 1992 alle 2 Monate gegen ein Normalbarometer absolut geeicht. Die maximal gemessenen Abweichungen betragen immer weniger als 3 hPa und lagen damit innerhalb der Gerätespezifikation [DAD92]. Der Mittelwert aus den drei Absolutdrucksensoren wird lau-

5. PTB = Abk. für Physikalisch Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin

fend von der "CDAQ" abgerufen und in den H1-Experimentdaten mitgeschrieben (vergl. Abb. 4.5).

b) Gasverteilung und Not-Belüftung der Kammern

In den Gassystemen II und III sind in den Rückleitungen von den Kammern bis in Raum 601 weder Ventile noch Flußmesser eingebaut. Im Gegensatz dazu können sämtliche Zuleitungen durch Ventile und/oder Flußmesser im Verteilerrack auf dem Trailer abgeschottet werden (vergl. Verrohrungspläne im Anhang E).

Mit Hilfe von Ventilen können in Gassystem I die Kammern von den Kreisläufen 1 (F-MWPCs und Planare) und 2 (Radiale) einzeln in den Reservekreislauf 4 "Spare" umgeschaltet werden. Wegen der hohen erforderlichen Gasflüsse in Gassystem II müssen stets alle Rohrleitungspaare der beiden Kreisläufe benutzt werden (Druckverlust in Leitungen). Deshalb erfolgt die Umschaltung der Kreisläufe in Raum 601.

Die Nadelventile der Flußmesser in den Verteilerracks sind im Normalfall voll geöffnet, damit keine zusätzliche Druckdifferenz aufgebaut werden kann. Deshalb kann dort der Fluß in die Kammern am zuverlässigsten abgelesen werden. Mit den Nadelventilen kann ein unterschiedlicher Strömungswiderstand einzelner Kammern desselben Kreislaufes ausgeglichen werden.

Zum Schutz vor Über- oder Unterdruck der Kammern im Alarmfall des Gassystems oder bei totalem Stromausfall sind die Rückleitungen aller Kammern über jeweils zwei stromlos offene Magnetventile SV8-Y mit dem "Argon Bubbler" verbunden (s. Abb. E7). Wegen der kleinen maximal zulässigen Druckdifferenz von wenigen Pa, ist ein normaler mit Flüssigkeit gefüllter Bubbler oder ein anderes einfaches mechanisches System für diese Aufgabe nicht einsetzbar. Der Argon Bubbler besteht aus einer ca. 45 cm hohen Propanflasche mit 27 l Volumen. Am oberen Ende sind drei Gasdurchführungen angebracht. Zwei Rohre reichen bis zum Behälterboden und die dritte Öffnung ist eine einfache Bohrung mit einem Durchmesser von 6 mm. Durch eines der beiden Rohre wird der Behälter ständig mit Argon gespült, das am oberen Ende durch die Bohrung wieder in die Halle entweicht. Der Druck des Argons im Bubbler beträgt am unteren Ende des zweiten Rohres etwa 7,3 Pa. Werden nun die Magnetventile geöffnet, so sind die Kammern über dieses Rohr direkt mit dem Argonvolumen verbunden. Im Fall von Überdruck wird das auströmende Kammergas soweit verdünnt, daß keine Explosionsgefahr mehr besteht. Im Fall von Unterdruck gelangt zum Druckausgleich Argon in die Rückleitung der Kammern. Daher kann auch hier kein explosives Gasgemisch erzeugt werden. Da Argon in fast allen Kammergasen eine Hauptkomponente darstellt, muß beim Wiederaanfahren des Systems die Anlage nicht gespült werden.

c) Kammerdruck

Zur Veranschaulichung der Druckverhältnisse im Detektor sind in Abb. 6.9 zwei benachbarte Kammern des Forward-Trackers schematisch dargestellt. Im Idealfall sollten alle Kammern einen leichten statischen Überdruck gegen die umgebende Atmosphäre besitzen. Das Problem wäre trivial, wenn die Gase in den Kammern und der Umgebung die gleiche Dichte hätten. In der Realität unterscheiden sich die Dichten jedoch. Wegen des unterschiedlichen Schweredruckes der Gase bilden sich Druckdifferenzen zwischen den Volumina aus, die sich in vertikaler Richtung ändern. Die Berechnung dieses Druckes Δp

kann mit einer Näherung der barometrischen Höhenformel erfolgen (vergl. Abb. 8.1):

$$\Delta p = \rho g \Delta h \quad \text{mit:} \quad \begin{array}{l} \rho = \text{Gasdichte} \\ g = \text{Erdbeschleunigung} \\ \Delta h = \text{Höhe der Gassäule} \end{array}$$

Zur Vereinfachung wird angenommen, daß die Drücke oben in den Kammern gleich dem Umgebungsluftdruck an dieser Stelle sind. Um den maximal möglichen Druckunterschied zwischen den beiden Kammern zu demonstrieren, sei die eine mit Helium ($\rho_0 = 0,17847 \text{ kg/m}^3$) und die andere Kammer mit Xenon ($\rho_0 = 5,896 \text{ kg/m}^3$) gefüllt (Luft: $\rho_0 = 1,2928 \text{ kg/m}^3$). Mit der oben angegebenen Formel ergeben sich die am unteren Rand der Kammern eingetragenen Schweredrucke. Die Druckdifferenzen zwischen den Kammern sowie zwischen einer Kammer und der Luft sind recht beachtlich. Der Außen- und Innenzylinder ist bei den Vorwärtskammern wesentlich stärker belastbar, als die Wand/Folie zur Nachbarkammer. Daher würden sich letztere wie eingezeichnet verbiegen. Das Beispiel zeigt eindrucksvoll wie wichtig es ist, große Dichteunterschiede in den Kammergasen des H1-Vorwärtsdetektors zu vermeiden. So bestehen z.B. die Trennwände zwischen den Radialen Driftkammern und den Radiatoren aus einer $50 \mu\text{m}$ dünnen Mylarfolie. Diese Folien sind die mechanisch empfindlichsten Gasbegrenzungen im gesamten H1-Spurkammersystem.

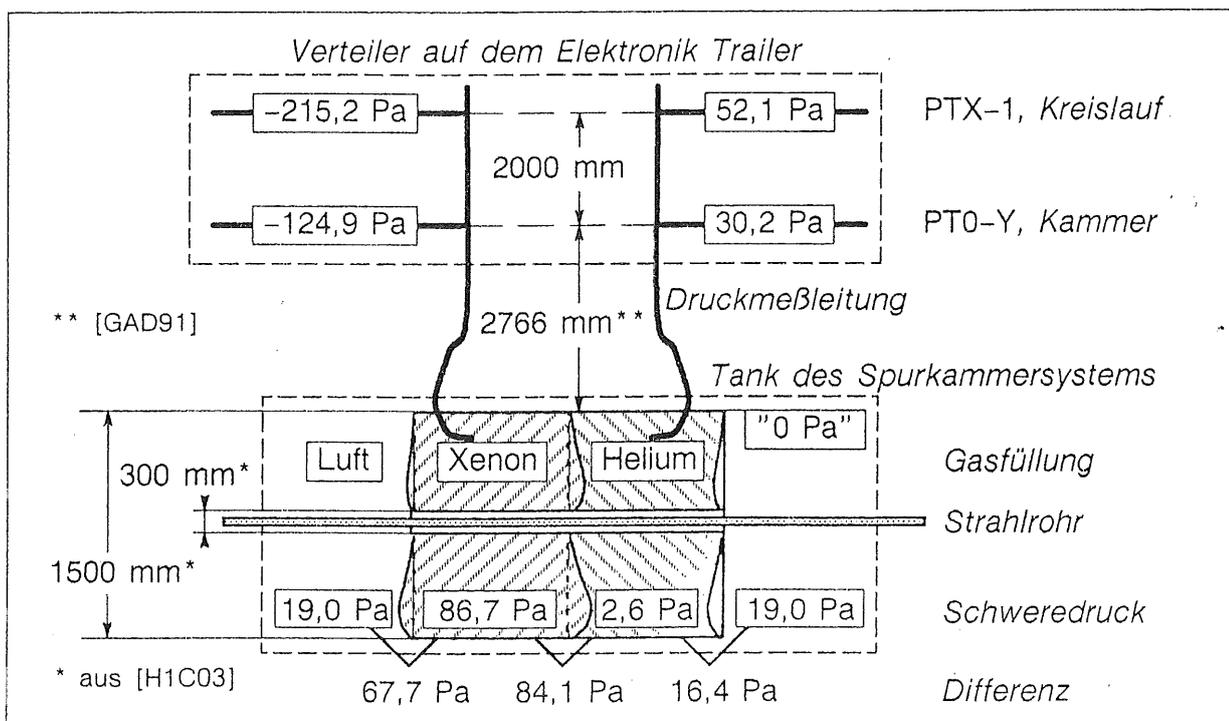


Abb. 6.9: Schema Druckverhältnisse im H1-Vorwärts-Detektor

Die Druckwandler zur Messung des Kammerinnendruckes *PT0-Y* und des Ist-Wertes *PTX-1* für die Druckregulierung befinden sich oberhalb der Kammern. Dort wird jeweils die Druckdifferenz zwischen dem Gas der Druckmeßleitung und der Umgebungsluft gemessen. Bei der Bestimmung des Nominalwertes der Druckregulierung ist also auch dieser Höhenunterschied zu berücksichtigen.

Um die realen Verhältnisse bei den H1-Kammern abzuschätzen, sind in Tab. 6.2 die nach Anhang F berechneten Dichten der in den Vorwärts-Kammern eingesetzten Gas-mischungen zusammengestellt. Mit Ausnahme der Gasmischung Helium/Ethan haben die Gasdichten und damit die Schweredrucke pro Höhenmeter ähnliche Werte, so daß hierdurch keine großen Druckunterschiede an den Kammerwänden auftreten. So ist zwar das schwere Edelgas Xenon (Nachweis von Übergangsstrahlung) im Gasgemisch 2 der Radialen Kammern enthalten, die Dichte der Gasmischung wird aber durch den Anteil des leichten Gases Helium wieder ausgeglichen. Wegen der hohen Diffusionsrate der Gase durch die Folie ist der Einsatz einer ähnlichen Gasmischung für die Radiatoren sinnvoll. Damit die Photonen der Übergangsstrahlung nicht im Radiator absorbiert werden, darf hier kein Xenon eingesetzt werden. Im Vergleich zu Kohlendioxid als Radiatorgas ist jedoch die Gasdichte des Helium/Ethan-Gemisches schlechter an die Dichte des Gases in der Radialen Kammer angepaßt.

Detektorteil(e)	Gasmischung + Additiv: (chem. Formel)	Verhältnis [%]	ρ_0^* [kg/m ³]	$\Delta p/\Delta h$ [Pa/m]
Pl. + F-MWPC	Ar/C ₃ H ₈ + C ₂ H ₅ OH :	(90/10) + 1	1,809	17,738
Radiale	1. Ar/C ₂ H ₆ :	(48/52)	1,562	15,314
	2. Xe/C ₂ H ₆ /He + i-C ₃ H ₇ OH : (20/40/40) + 1		1,802	17,674
Radiatoren	1. CO ₂ :	(100)	1,977	19,387
	2. He/C ₂ H ₆ :	(60/40)	0,650	6,372
* Mittelwert aus den Normaldichten bei 273,15 K und 1013,25 hPa				

Tab. 6.2: Dichte der Gasmischungen in den H1-Vorwärts-Spurkammern

Zur Berechnung der Druckdifferenzen zwischen den Kammern sowie der absoluten Gasdichte in einer Kammer (Driftgeschwindigkeit) müssen die tabellierten Werte noch korrigiert werden. So betrug die mittlere in 1993 gemessene Kammertemperatur $30^\circ\text{C} \pm 1,6^\circ\text{C}$ (Abb. 6.4), so daß die Dichte innerhalb der Kammer um ca. 10% geringer war. Folglich war auch die Belastung der Kammerwände durch den Schweredruck um den gleichen Prozentsatz vermindert. Bei einer gemessenen mittleren Umgebungstemperatur von $24^\circ\text{C} \pm 0,6^\circ\text{C}$ (Abb. 6.3) sind die Gasdichten am Ort der Druckwandler um etwa 8% kleiner als die Tabellenwerte. Der mittlere gemessene Luftdruck in 1993 (1009,0 hPa, s. Abb. 6.5) weicht nur wenig vom Normaldruck (1013,25 hPa) ab. Selbst bei den extremen Abweichungen von ± 30 hPa sind die Dichten lediglich um $\pm 3\%$ gegenüber dem Wert bei Normaldruck zu korrigieren. Je nach Flußwiderstand des Gasvolumens und hohen Gasflüssen durch die Kammern können sich die Druckverhältnisse leicht verschieben.

6.4 Kammerdruckregulierung

In Abb. 6.10 ist ein sägezahnartiges Pendeln des Kammerdrucks zwischen den Regelgrenzen dargestellt, wie man es unter idealen Bedingungen erwarten würde. Darunter ist die Ventilstellung des Ein- und Auslasses eingezeichnet. Die Steigungen der eingezeichneten Druckverläufe und die Ventilöffnungszeiten sind abhängig von der Höhe und dem Verhältnis der manuell eingestellten Flußraten (vergl. hierzu Abb. 6.7).

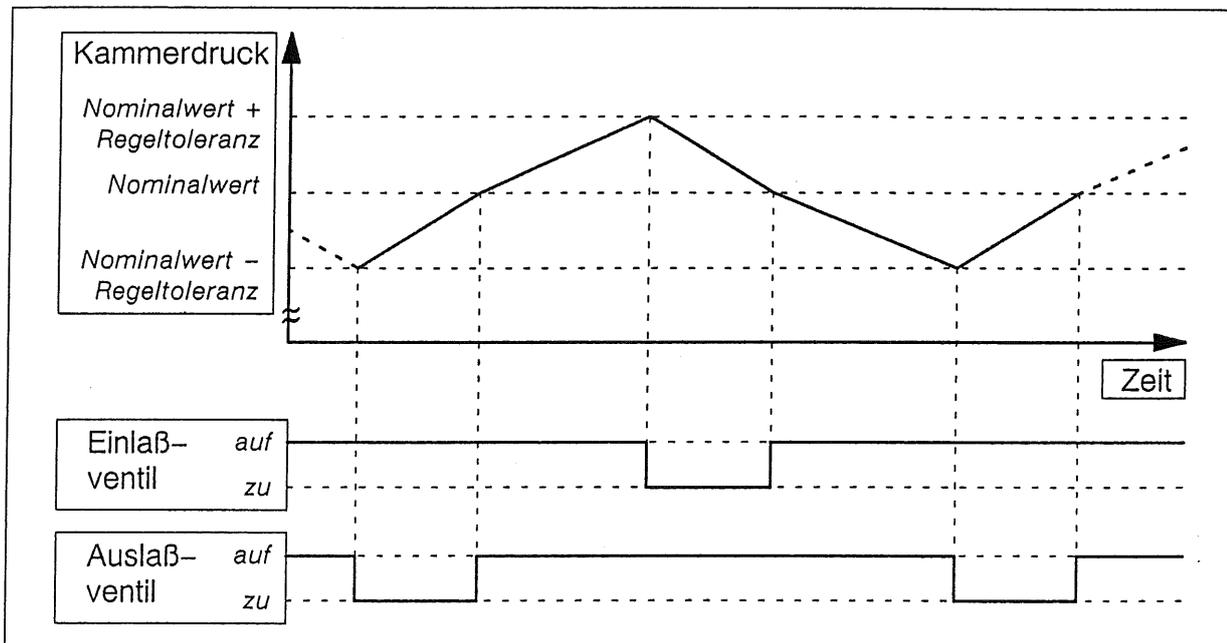


Abb. 6.10: Schema einer idealen Drucksteuerung mit zwei Ventilen

Die wichtigsten Effekte, die den tatsächlichen zeitlichen Druckverlauf in den Kammern bestimmen, werden im folgenden kurz skizziert.

Die Ansprechzeiten der verwendeten Magnetventile und der Drucksensoren sind kürzer als 20 ms. Die Reaktionszeit für Datenübertragung, Digitalisierung und Rechnerbearbeitung der Meßwerte bis zur Aktivierung der Ventile liegt in der gleichen Größenordnung. Daher ist der Einfluß dieser Größen auf das Zeitverhalten des Kammerinnendrucks zu vernachlässigen.

Die Ausbreitung von Druckänderungen geschieht mit der Schallgeschwindigkeit im Medium (typ. etwa 300 m/s). Druckimpulse, die z.B. beim Betätigen der Magnetventile entstehen, werden durch Reibungsverluste in Flußmessern, Ventilen und den langen Rohrleitungen so stark gedämpft, daß bereits in der Verteilerstation keine Auswirkung mehr meßbar ist.

Aufgrund der Strömungsverluste dauert es nach Öffnen eines Ventils bis zu einigen Sekunden, ehe der Druckgradient im Rohr einen konstanten Endwert Δp erreicht. Während dieser Zeit wird mit dem in die Leitung ein-/ausströmenden Gasfluß noch die Gasmenge $0,5 \cdot \Delta p \cdot V_{\text{Leitung}}$ dem Rohr zu-/abgeführt. Daher steigt in diesem Zeitraum auch der Fluß am Ende der Leitung und der Druck in der dort angeschlossenen Kammer steigt/fällt nicht linear wie oben dargestellt. Beim Schließen eines Ventils ist das gleiche Verhalten zu beobachten, da hier der durch den Fluß verursachte Druckgradient wieder abgebaut wer-

den muß. Bei hohen Flußraten und kleinem Kammervolumen sind die Auswirkungen auf den Kammerdruck am größten. Im Bild des zeitlichen Druckverlaufs werden die Regelgrenzen überschritten und der gesamte Kurvenverlauf wird sinusförmiger (Abb. 6.11 rechts unten).

Im Vergleich zu den Versorgungsleitungen sind Länge, Fluß und Volumen der Druckmeßleitungen kleiner. Die durch Rohrreibung verursachte Zeitverzögerung zwischen einer Änderung des Kammerdrucks und dem Erreichen dieses Druckes an der Meßseite der Leitung liegt deutlich unterhalb einer Sekunde.

Eine wichtige Rolle im Druckverhalten spielt die Elastizität der Kammerbegrenzung. Je kleiner die einer Volumenveränderung entgegenwirkende Rückstellkraft der Kammerwände ist desto runder und flacher wird der Verlauf des Kammerdrucks. Bei "weichen" Kammern wird besonders das Überschreiten der Regelgrenzen vermindert, wodurch höhere Gasflüsse als in "harten" Kammern möglich sind. Bei den Kammern des H1-Spurkammersystems ist zusätzlich der Druck in den benachbarten Kammern zu berücksichtigen, der über die elastische Kammerwand übertragen wird (Abb. 6.11 oben).

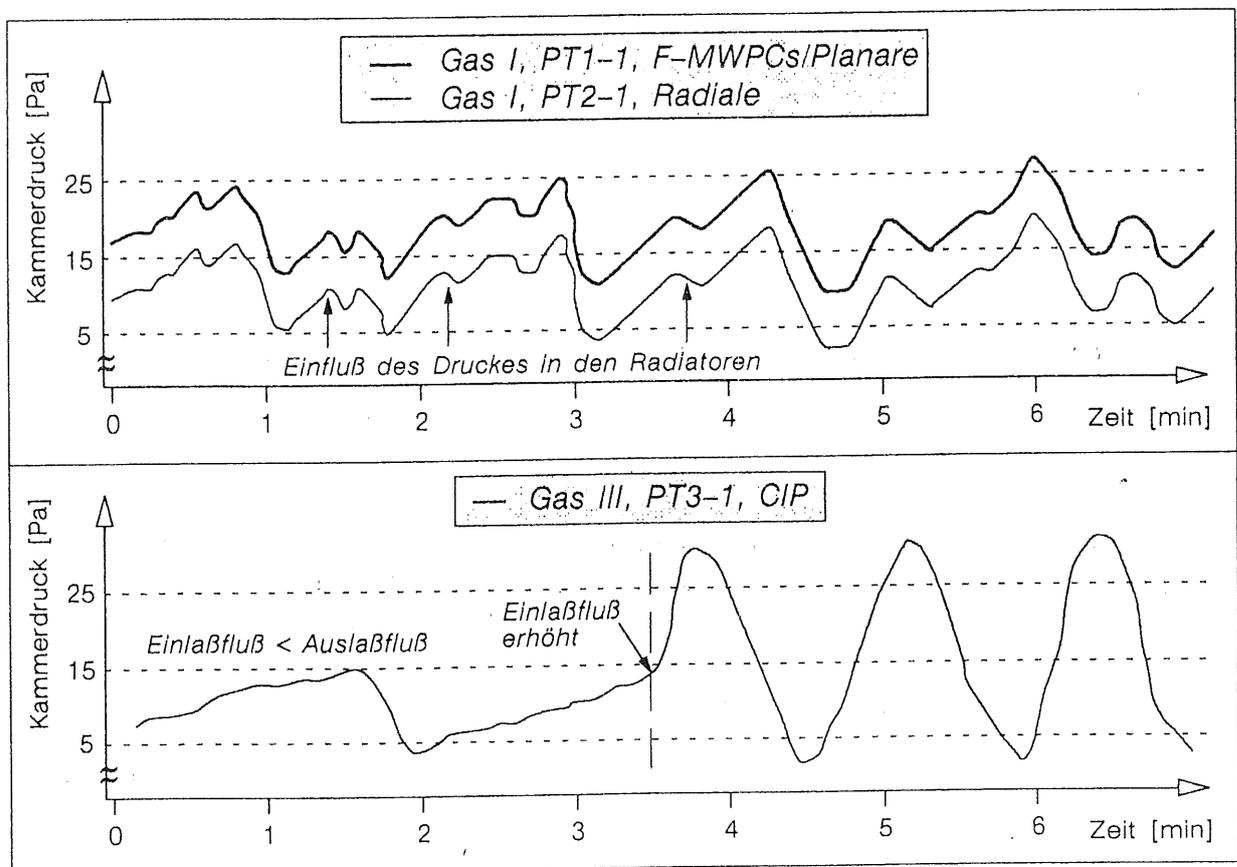


Abb. 6.11: zeitlicher Druckverlauf in H1-Spurkammern

Durch geeignete Wahl der Versorgungsflüsse kann die Regelung auf das Schalten eines Ventils verlagert werden. So kann z.B. durch Erhöhen des Gasflusses von der Kammer und einem gleichzeitig moderaten Gasfluß zur Kammer die Regelung so verschoben werden, daß das Einlaßventil der Kammer ständig geöffnet bleibt (Abb. 6.11 links unten). Dieser Zustand ist für alle Kreisläufe des Gassystems III wünschenswert, da die elektroni-

schen Massenflußregler relativ träge auf ein Stoppen des Gasflusses im Einlaß reagieren. Mit diesem Trick wird ein kontrollierter, gleichmäßiger Fluß in die Kammern gewährleistet, ohne auf die Sicherheit der Druckregelung mit Magnetventilen verzichten zu müssen.

Die typischen Flußraten und die maximalen Flüsse der Kammern sind in Tab. 6.3 zusammengestellt. Es handelt sich hierbei um experimentell ermittelte Werte, mit denen ein automatischer Betrieb der Gassysteme sinnvoll bzw. gerade noch sicher möglich ist. Weiterhin sind die aktuellen Nominalwerte der Kammerdrücke sowie die Regeltoleranzen und maximal zulässigen Drücke aufgelistet. Die Tab. 6.3 ersetzt Tab. 4.1, in der die zur Zeit der Entwicklung und des Baus der Gassysteme gültigen Drücke und Flüsse aufgeführt sind.

Detektor- teil(e)	Gas- volumen	Gasmischung + Additiv (Volumenverhältnis)	Druck relativ zum Luftdruck		Flußrate	
			Nom. ±Reg.	max.	typ.	max.
	[NI]	[%]	[Pa]	[Pa]	[l/min]	[l/min]
Planare + F-MWPC	-900	Ar/C ₃ H ₈ + C ₂ H ₅ OH (90/10)+1	+15 ±10	±100	1,3	3
Radiale Kammern	-700	1) Ar/C ₂ H ₆ (48/52) 2) Xe/C ₂ H ₆ /He + i-C ₃ H ₇ OH (20/40/40)+1	+15 ±10	±100	1,0	3
Radiato- ren	-500	He/C ₂ H ₆ (60/40)	+25 ±10	±100	0,1	1,5
CJC 1	-1140	1) Ar/CO ₂ /CH ₄ (89,5/9,5/1)	+150 ±50	±1000	1,5	3
CJC 2	-3080	2) Ar/C ₂ H ₆ + H ₂ O (50/50)+0,5	+150 ±50	±1000	4,5	9
CIZ	-55	Ar/CH ₄ + H ₂ O (80/20)+0,2	+15 ±10	±100	0,1	0,6
COZ	-240	Ar/C ₂ H ₆ + i-C ₃ H ₇ OH (48/52)+1			0,2	0,8
CIP	-30	Ar/C ₂ H ₆ /CF ₂ Cl ₂ + H ₂ O (49,9/49,9/0,2)+0,2			0,07	0,6
COP	-150	Ar/C ₂ H ₆ /CF ₂ Cl ₂ (49,9/49,9/0,2)			0,1	0,6
B-MWPC	-120	Ar/C ₂ H ₆ /CF ₂ Cl ₂ (49,9/49,9/0,2)			0,1	0,6

Tab. 6.3: Parameter Gas, Druck und Fluß im H1-Spurkammersystem (1993)

Der erlaubte Bereich des Kammerdrucks liegt oberhalb des Umgebungsdrucks, um eine automatische Leckkontrolle durchführen zu können. Mit Ausnahme der Rückleitung einer Kammer bis zur Kreislaufpumpe muß in allen Bereichen des Kreislaufes und der Kammer Überdruck herrschen. Im Fall eines Gaslecks kann ein Überdruck in der Kammer nicht aufrecht erhalten werden und das System schaltet bei Unterschreiten der Alarmschwelle

automatisch ab. Da der Druck im Barrel eines geschlossenen Kreislaufes durch ein Sicherheitsventil auf maximal 160 kPa Überdruck begrenzt ist, kann in diesem Fall höchstens eine Gasmenge von etwa 130 l austreten. Normalerweise beträgt der durch einen elektrischen Druckmesser überwachte Überdruck nur 30 bis 60 kPa, so daß im normalen Betrieb maximal etwa 25 l Gas austreten können. In den offenen Kreisläufen des Gassystems III ist die Flußrate sowohl durch mechanische Flußmesser als auch durch elektrische Massenflußmesser begrenzt. Deshalb kann bei Auftreten eines Lecks im Überdruckbereich des Systems der Kammerdruck nicht gehalten werden und das System schaltet in den Alarmzustand.

Bei Lecks im Unterdruckbereich wird der Druck im Barrel eines geschlossenen Kreislaufes solange ansteigen, bis die Alarmgrenze des elektrischen Drucksensors erreicht ist und das System automatisch abschaltet. Bei den offenen Kreisläufen kann ein Leck im Unterdruckbereich durch einen verminderten Saugdruck der Kreislaufpumpe und einen erhöhten Wert des elektrischen Flußmessers festgestellt werden. An dieser Stelle werden kurz weitere Maßnahmen vorgestellt, mit denen Lecks in den H1-Gasanlagen festgestellt werden können.

Eine grobe Leckkontrolle stellt die Überwachung des Gasverbrauches bei den offenen Kreisläufen dar. Wesentlich sensitiver sind die in den Gassystemen installierten Geräte zur Gasqualitätsüberwachung (vergl. Kap. 8.). Die kleinen Kammern in den offenen Kreisläufen werden in regelmäßigen Zeitabständen auf Dichtigkeit getestet, indem nach Stoppen des Gasflusses die Geschwindigkeit des Druckabfalls gemessen wird. Diese Methoden führen nicht automatisch zu einem Abschalten der Gasanlagen. An allen Orten mit Gasinstallationen sind Gasmelder [SI910] installiert, die auf die verwendeten brennbaren Kammergasanteile geeicht sind. Überschreitet der gemessene Anteil 20% bzw. 40% der minimalen Brennbarkeitskonzentration so wird ein "Voralarm" bzw. "Gasalarm" ausgelöst. Ein Voralarm wird im Hauptkontrollraum des Experimentes und bei der DESY-Sicherheitsabteilung angezeigt und die Personen im H1-Gebäude werden durch optische und akustische Signale gewarnt. Bei Gasalarm wird zusätzlich die Stromzufuhr zu den Gasversorgungsanlagen unterbrochen und im H1-Gebäude ein "Hallenräumungsalarm" ausgelöst.

7. Reinigung der Gase

Die wichtigsten Möglichkeiten der Gasreinigung werden kurz beschrieben und auf Verwendbarkeit innerhalb der H1-Gassysteme überprüft. Da erstmalig in geschlossenen Gaskreisläufen für Drift- und Proportionalkammern eine Reinigung von Gasen mit Wasser- und Alkoholdampfung zugesetzt geplant war, werden notwendige Voruntersuchungen hierzu präsentiert. Es schließt sich eine Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise der im H1-Experiment eingesetzten Anlagen an. Betriebserfahrungen und Meßdaten zur Überprüfung der Reinigungswirkung dieser Anlagen bilden den Abschluß des Kapitels.

7.1 Methoden zur Gasreinigung

Für einen optimalen Betrieb von Drift- und Proportionalkammern müssen hohe Anforderungen an Reinheit und Langzeitstabilität der Gasgemische gestellt werden. Unerwünschte Bestandteile im Gasgemisch stören schon in geringer Konzentration die Nachweiseigenschaften der Kammern. Diese Substanzen beeinflussen die Primärionisation, das Driftverhalten der erzeugten Elektronen und die Gasverstärkung oder führen durch Anlagerung an den Elektroden zu Alterungserscheinungen. Die Langzeitstabilität der Gaszusammensetzung kann nur mit Hilfe von geschlossenen Kreisläufen garantiert werden. Hierbei ist jedoch der Einsatz von Gasreinigern zwingend erforderlich, da sich unerwünschte Gase im System akkumulieren. Aus den Kammergasen müssen die durch unvermeidliche Lecks und Diffusion eingetretenen Komponenten Sauerstoff, Stickstoff und Wasser entfernt werden. Weitere Verunreinigungen gelangen durch langsame aber stetige Desorption aus den gasführenden Oberflächen ins Kammergas und akkumulieren sich dort. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um Wasser, Lösungsmittelrückstände und höhere Kohlenwasserstoffe. Weiterhin werden in den Kammern die Moleküle des Kammergases durch radioaktive Strahlung und Gasverstärkung aufgebrochen. Die entstehenden, sehr reaktiven Alkanrestmoleküle verbinden sich leicht durch Polymerisation zu Kohlenwasserstoffketten.

Zur Entfernung der genannten Stoffe sind zwei unterschiedliche Reinigungsprinzipien zu betrachten. Bei der ersten Möglichkeit wird das Gasgemisch zunächst in einzelne Komponenten zerlegt. Durch mehrmaliges Anwenden einer Trennmethode wird die Reinheit der individuellen Komponenten stetig erhöht. Die diversen benötigten Trennverfahren bedeuten einen hohen apparativen Aufwand und sind schlecht zu automatisieren. Weiterhin muß zum Erreichen einer ausreichenden Reinheit jede Trennstufe mehrmals durchlaufen werden. Ein gravierender Nachteil dieser Vorgehensweise ist, daß das Gasgemisch stän-

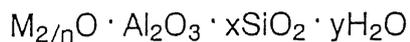
dig neu herzustellen ist. Damit würde man auf den Hauptvorteil geschlossener Gaskreisläufe – die Langzeitstabilität der Gaszusammensetzung – verzichten müssen.

Daher wurde in einer zweiten Variante untersucht, ob durch den Einsatz von universellen Gasreinigern eine Entfernung der unerwünschten Bestandteile ohne Vortrennung des Gasgemisches möglich ist. Diese würden direkt in den geschlossenen Kreislauf integriert werden können. Für den Einsatz in den H1-Gassystemen wurde nach solchen Reinigern gesucht.

Wegen ihrer einfachen Handhabbarkeit und hohen Reinigungswirkung haben sich Molekularsiebe in Gasversorgungsanlagen für Experimente der Hochenergiephysik durchgesetzt. Sie dienen der selektiven Entfernung von Wasser und höheren Kohlenwasserstoffen. Zur Sauerstoffentfernung werden katalytische Reiniger bevorzugt. Die beiden Reinigertypen sowie ein Kombinationsreiniger aus diesen beiden werden vorgestellt.

a) Molekularsiebe

Molekularsiebe sind kristallographisch in die Gruppe der Zeolithe einzuordnen. Etwa 1945 begann die großtechnische Produktion dieser künstlichen Zeolithe. Sie werden in zunehmendem Maße zur adsorptiven Trennung eingesetzt und haben in vielen praktischen Anwendungsbereichen andere Trennverfahren (z.B. Destillation) verdrängt. Molekularsiebe sind Alkali- oder Erdalkalisilikate, deren primäre Strukturen aus kristallinen AlO_4 - und SiO_4 -Tetraedern bestehen. Zum Ausgleich der negativen Ladung des AlO_4 - Tetraeders sind Calcium-, Natrium- oder Kaliumionen 'M' der Wertigkeit 'n' eingebaut. Die allgemeine chemische Zusammensetzung ist demnach gegeben durch [WIR00]:



'x' und 'y' sind nicht ganzzahlige Verhältniszahlen, wobei x typischerweise zwischen 1 und 35 liegt und y deutlich größer sein kann. Die primären Tetraeder ordnen sich zunächst zu einem Kubooktaeder an. Bei der einfachsten Anordnung, dem Zeolith-Kristall Typ A, werden dann jeweils acht dieser Kubooktaeder über die quadratischen Flächen zu einem Würfel verbunden (Abb. 7.1).

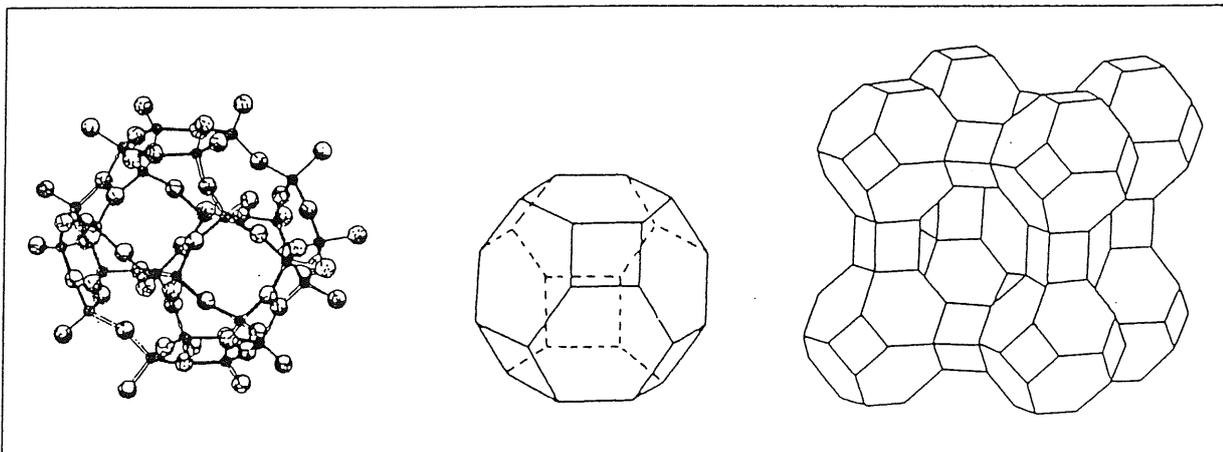


Abb. 7.1: Molekularer Aufbau und Grundstruktur eines Molekularsiebs des Typs A aus [SUP89, KAS88]

Durch Austreiben des Kristallwassers bei Temperaturen von bis zu 500°C entsteht die gewünschte Porenstruktur mit Hohlräumen definierter Größe. Hinreichend kleinvolumige Moleküle können in diese Höhlen eindringen und werden dort von van der Waals Kräften festgehalten [KAS88]. Molsiebe funktionieren also genau umgekehrt wie ein "normales" Sieb.

Die Kristalle liegen in Pulverform vor und werden beispielsweise zur Beschichtung von Trennsäulen für die Gaschromatographie eingesetzt. Da für die Anwendung in Reinigern diese Form zu fein ist, werden die Kristalle meist mit Lehm binder versetzt und zu Stäbchen oder Kugel granuliert. Dabei entstehen Zugangsporen mit einer Weite von bis zu 300 nm. Die Adsorptionseigenschaften dieses Produktes beruhen auf der großen inneren Oberfläche, den hohen elektrostatischen Adsorptionskräften und dem Molekularsiebeffekt. Für den Siebeffekt ist der kritische Moleküldurchmesser der Substanzen maßgebend. Man versteht hierunter den Durchmesser der das Molekül umschreibenden Kugel oder bei Kettenmolekülen den Durchmesser des größten Umkreises senkrecht zur Kette [WIR00]. Molekularsiebe können alle Stoffe adsorbieren, deren kritischer Moleküldurchmesser kleiner als die Porengröße ist. Durch Toleranzen bei der Herstellung, die Elastizität der Moleküle und kinetische Effekte können allerdings auch noch etwas größere Moleküle adsorbiert werden, als dem rein rechnerischen Porendurchmesser entspricht. Im allgemeinen werden deshalb von den Herstellern die effektiven Porendurchmesser angegeben, entsprechend der gerade noch adsorbierbaren Molekülgröße. Die Bezeichnung der Molekularsiebe besteht meist aus einer Zahl, die mit dem effektiven Porendurchmesser in Angström zusammenhängt sowie einem Buchstaben, der die Käfigstruktur des Molekularsiebes charakterisiert (Tab. 7.1). Infolge der hohen elektrostatischen Kräfte werden bevorzugt polare (z.B. H₂O) oder leicht polarisierbare Substanzen (z.B. CO₂) adsorbiert. Aufgrund dieser Eigenschaften eignen sich Molekularsiebe hervorragend für die Entfernung dieser Stoffe aus den unpolaren Gasgemischen, wie sie bei H1 verwendet werden.

Die Aufnahmekapazität eines Molekularsiebes steigt mit der Vollständigkeit seiner Aktivierung, einer strömungsgünstigen Konfiguration des Trockenbettes, einer niedrigen Eingangskonzentration der zu entfernenden Substanz und einer kleinen Gasflußrate. Wichtigster Parameter ist die Temperatur, da das Adsorptionsvermögen des Reinigers umgekehrt proportional zu dieser ansteigt. So wird bei Raumtemperatur (-20°C) im Molsieb 3A fast ausschließlich Wasser angelagert. Die Konzentration der übrigen in Tab. 7.1 mit einem "x" versehenen Substanzen wird nicht meßbar beeinflußt. Theoretisch beträgt die Trocknungskapazität zwischen 20 und 25% des Gewichtes. Da in der Praxis weder die Reinigermaterialien noch die oben genannten Bedingungen ganz ideal sind, ist die praktisch nutzbare Kapazität geringer.

Ein nützlicher Vorteil dieser Reiniger ist ihre Regenerierbarkeit. Hierzu wird bei einer Temperatur von ca. +200°C Inertgas (Helium) durch das Molsieb geleitet. Bei dieser Temperatur werden die adsorbierten Substanzen zu einem hohen Prozentsatz wieder desorbiert und mit dem Gasstrom aus dem Reiniger entfernt.

Ein Molekularsieb vom Typ 3A soll hauptsächlich zur Adsorption von Wasser und der Typ 5A zur Adsorption von höheren Kohlenwasserstoffen eingesetzt werden. Laut Literatur [KAS88, WIR00, GGM85] sollten diese Materialien eine ausreichende Aufnahmekapazität für die Verunreinigungen besitzen, ohne aber die erwünschten Komponenten zu adsorbieren.

Gas	krit. Ø	Adsorption durch Molekularsieb Typ (effekt. Ø [Å])					
Formel	[Å]	3A (3,8)	4A (4,2)	5A (5,0)	ZSM5 (6)	10X (8)	13X (9-10)
He	2,0	x	x	x	x	x	x
Ar	3,83	(x) _{KAS88}	x	x	x	x	x
Kr	3,9	-	(x) _{KAS88}	x	x	x	x
Xe	4,37	-	(x) _{KAS88}	x	x	x	x
H ₂	2,4	x	x	x	x	x	x
N ₂	3,0	x	x	x	x	x	x
O ₂	2,8	x	x	x	x	x	x
H ₂ O	2,6	x	x	x	x	x	x
CO ₂	2,8	-	x	x	x	x	x
CH ₄	4,0	-	x	x	x	x	x
C ₂ H ₄	4,25	-	(x) _{WIR00}	x	x	x	x
C ₂ H ₆	4,44	-	x	x	x	x	x
C ₃ H ₆	5,0	-	(x) _{WIR00}	x	x	x	x
C ₃ H ₈	4,9	-	-	x	x	x	x
CH ₃ OH	3,0	-	x	x	x	x	x
C ₂ H ₅ OH	n. bek.	-	x	x	x	x	x
Freon 12	n. bek.	-	-	x	x	x	x
C ₄ H ₁₀ C ₁₈ H ₃₈		-	-	x	x	x	x

x : Adsorption des Gases möglich; - : keine Adsorption durch Molekularsieb

Tab. 7.1: kritischer Durchmesser ausgewählter Gase und Adsorptionsmöglichkeit in diversen Molekularsieben nach [KAS88, WIR00]

b) Der Kupfer-Katalysator R 3-11[®] 1

Der Katalysator besteht aus etwa 30% Kupfer, das in hochdispenser Form auf einem inerten Träger fixiert ist und durch verschiedene Zusätze stabilisiert und aktiviert wird. Mit diesem Katalysator können sowohl oxidierende als auch reduzierende Verunreinigungen aus Gasen, Gasgemischen und Flüssigkeiten entfernt werden. Das Hauptanwendungsgebiet ist die Beseitigung von Sauerstoff aus gasförmigen Gemischen, wobei der Einsatz katalytisch oder adsorptiv erfolgen kann [BAS71].

Bei katalytischer Arbeitsweise wirkt der reduzierte Katalysator oberhalb von 70°C beim Entfernen von Sauerstoff durch Reaktion mit zugesetztem Wasserstoff oder Kohlenmonoxid nach folgenden Gleichungen:



Diese Reaktionen verlaufen exotherm. Die Reinigungseffizienz steigt mit der Temperatur,

1. Katalysator R 3-11[®] = Handelsname der Firma BASF AG

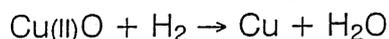
die im Dauerbetrieb 250°C nicht überschreiten sollte. Die Aufnahmekapazität beträgt maximal 50 l(O₂)/kg Reinigermaterial. Die entstehenden Reaktionsprodukte können mit einem nachgeschalteten Molsieb 3A wieder aus dem Gemisch entfernt werden.

Bei adsorptiver Arbeitsweise reagiert das reduzierte Kupfer im Katalysator chemisch mit dem Sauerstoff. Auf diese Weise kann man Sauerstoff auch dann entfernen, wenn dieser nicht mit dem Gas oder den Bestandteilen des Gemisches reagieren kann. In diesem Fall wird solange Sauerstoff am Kupfer chemisorbiert bis dieses zum Kupfer(II)oxid oxidiert worden ist:



Diese Reaktion findet bereits bei Raumtemperatur statt, doch kann die Aufnahmekapazität des Katalysators durch Temperaturerhöhung beträchtlich gesteigert werden. Die durch Chemisorption erreichte Kapazität beträgt bei Raumtemperatur (-20°C) jedoch nur etwa 5 l(O₂)/kg Reinigermaterial [BAS71].

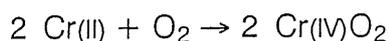
Bei adsorptiver Betriebsweise muß das Reinigermaterial bei erschöpfter Kapazität regeneriert werden. Die Regeneration kann beliebig oft wiederholt werden. Hierzu wird der Katalysator im Inertgasstrom (Helium) auf 120–140°C vorgeheizt, bis das Reduziergas (1–5% Wasserstoff) zugesetzt wird. Danach kann die folgende Umkehrreaktion ablaufen:



Der Beginn der Reduktion des Kupfers läßt sich an einem deutlichen Temperaturanstieg sowie an einer Kondensatbildung (Wasser) im Abgas erkennen. Auch bei dieser exothermen Reaktion darf die Temperatur nicht über 250°C ansteigen, da sonst die Aktivierung des Katalysators beeinträchtigt wird. Die Regeneration ist beendet, wenn keine Kondensatbildung mehr zu beobachten ist.

c) Die Oxisorb®-Patrone ¹

Der Oxisorb ist eine Kombination aus zwei Reinigermaterialien und besteht aus einem Chrom-Katalysator mit Molsieb 5A. Das Gas in der Reinigerpatrone durchströmt zuerst das Molsieb. Die Trocknung ist erforderlich, da die zweite Reinigerstufe durch Wassereintrag irreversibel deaktiviert wird. Als Katalysator dieser Stufe dient Chrom(II)oxid, das auf einem Kieselgel (SiO₂) als Trägermaterial aufgebracht ist. Analog dem Kupfer im Katalysator R 3–11 oxidiert der Sauerstoff das Chrom in einer chemisorptiven Reaktion:



Das Adsorptionsvermögen des Oxisorbs beträgt etwa 1,8 l(O₂)/kg und ist im Bereich von -190°C bis +300°C nahezu unabhängig von der Temperatur. Diese Reinigungspatronen können vom Anwender nicht selbst regeneriert werden und müssen bei erschöpfter Kapazität ausgetauscht werden [MGR85]. Der Vorteil hierbei ist, daß keine Heizungen zur Regeneration benötigt werden. Zum Austausch einer Patrone muß der Gaskreislauf jedoch geöffnet werden. Bevor der Kreislauf wieder geschlossen wird, muß die neue Patrone über eine entsprechenden Ventilschaltung mit Kammergas gespült werden.

1. Oxisorb® = Handelsname der Fa. Messer Griesheim GmbH

Es besteht keine Möglichkeit, den Oxisorb im geschlossenen Kreislauf bei H1 einzusetzen, da jedes der Additive den Katalysator zerstören würde [MGR85]. Wasser reagiert mit Chromtrioxid zu Chromsäure und zerstört mechanisch das Trägermaterial (Kieselgel). Alkohole werden an Chromoxiden zersetzt, gebunden und zu Ketonen/Aldehyden oxidiert (vergl. [GÖT91]). Da über mögliche Wechselwirkungen der Molekularsiebe und des Kupfer-Katalysators mit den genannten Additiven keine definitiven Aussagen vorlagen, waren umfangreiche Voruntersuchungen nötig.

d) Das Stickstoffproblem

Die Funktionsfähigkeit der vorgestellten Reiniger ist in vielen Gasversorgungsanlagen für Drift- und Proportionalkammern schon bewiesen worden. Eine quantitativ brauchbare Stickstoffadsorption unter Normalbedingungen konnte leider bei keinem dieser Reiniger gemessen werden.

Die meisten gängigen Verfahren hierzu arbeiten mit Titanöfen bei Temperaturen von über 700°C. Diese Verfahren sind in den geschlossenen Kreisläufen der H1-Gassysteme nicht einsetzbar, da die Kohlenwasserstoffe bei solch hohen Temperaturen zerstört (Pyrolyse bei $T > 500^\circ\text{C}$ [ALL80]) und mit dem Titan reagieren würden.

Da dieses ein Problem von allgemeinem Interesse bei Gasversorgungsanlagen in der Hochenergiephysik ist, wurde im NIKHEF¹ nach alternativen Verfahren gesucht. Die Nitrierung von Lithium und Calcium sollte theoretisch schon bei niedrigen Temperaturen funktionieren. Da Li_3N schon bei Raumtemperatur explosiv ist, wurde in einem Testaufbau nur das Reinigungsverhalten von Calcium untersucht. Schon bei Temperaturen ab 340°C wurde damit eine brauchbare Stickstoffentfernung gemessen [DIJ88]. Vorher müssen jedoch Sauerstoff und besonders Wasser sowie Alkohole bis auf wenige ppm abgetrennt werden, da sonst, statt der gewünschten Nitrierung, eine Oxidation am Calcium bevorzugt würde [DIJ89]. Auch dieses Verfahren paßt also nicht ins Konzept der H1-Gassysteme, da ein Abtrennen und ein erneutes Zumischen der Additive zwingend notwendig wäre.

Auf Versuche, bei tiefen Temperaturen ($\ll 0^\circ\text{C}$) eine Stickstoffadsorption im Molsieb zu erreichen, wurde verzichtet, da hierbei auch die verwendeten Additive (Taupunkte etwa $-19\dots 0^\circ\text{C}$) und höhere Kohlenwasserstoffe auskondensieren würden. Die Hoffnung war, daß die an die Gassysteme angeschlossenen Kammern und Zuleitungen nur eine kleine Leckrate aufweisen. Der akkumulierte Stickstoffanteil sollte dann durch partiellen Gasaustausch auf einem akzeptablen Niveau gehalten werden können.

1. NIKHEF = Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-Energiefysica, Amsterdam, Niederlande

7.2 Reinigerverhalten mit Wasser und Alkoholdämpfen

Bei den H1-Gassystemen bestand erstmalig die Aufgabe, die Kammergase in geschlossenen Gaskreisläufen mit den Zusätzen Wasser, Ethanol und 2-Propanol zu betreiben. Eine Beimischung von Additiven zum Kammergas ist mit fortschreitender Zeit von immer mehr Kammerbetreibern als notwendig erachtet worden. Die Untersuchungen zum Verhalten der in 7.1 vorgestellten Reiniger mit den Additiven werden in historischer Reihenfolge behandelt. Das Ziel war ein Verfahren zu finden, mit dem ohne Abtrennung der Additive oder Kohlenwasserstoffe aus dem Kammergas eine Reinigung in geschlossenen Kreisläufen möglich ist.

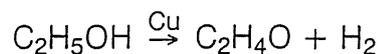
Von Beginn an sollte 1 Vol% Ethanoldampf dem Vorgemisch Argon-Propan (90/10) für die MWPCs und Planaren Driftkammern zugemischt werden. Weiterhin sollte 2-Propanol (dampfförmig) zum Argon/Ethan-Gemisch (48/52) für die Radialen Driftkammern addiert werden. Anschließend bestand der Wunsch, die zentralen Jet-Kammern mit einem Wasserdampf- und/oder Alkoholanteil im Argon/Ethan-Gemisch (50/50) zu versorgen.

a) Reiniger mit Ethanoldampf

Im Rahmen einer Diplomarbeit [KEM90] wurde das Verhalten des Molekularsiebs 3A und des Kupfer-Katalysators R 3-11 mit Ethanoldampf untersucht. Nach einer gründlichen Regeneration sind beide Reiniger einzeln bei Raumtemperatur mit einem Argon/Ethan/Propan-Gemisch betrieben worden. Dann wurden die Kammergase durch ein Gefäß mit einer definierten Menge flüssigem Ethanol geleitet. Der resultierende Ethanolanteil im Gas entsprach dem Dampfdruck bei 19°C. Eine Kontrolle auf mögliche Reaktionen des Alkohols mit dem Reinigermaterial erfolgte mit Hilfe eines Gaschromatographen [VAR37].

Entgegen den Angaben in Tab. 7.1 sind vom Molsieb 3A etwa 40 ml(C₂H₅OH_{fl.})/kg Reinigermaterial adsorbiert worden. Die geringe Ethanoladsorption wurde auf eine herstellungsbedingte Variation der Porengröße des Molsiebmaterials zurückgeführt und sollte keine grundsätzliche Beeinträchtigung des Reinigerverhaltens darstellen. Nach einer Sättigungsphase funktionierte weiterhin die Wasseradsorption, und es wurden keinerlei unerwünschte Reaktionsprodukte gemessen.

Die Zusammenführung von Ethanol und Kupfer-Katalysator ist im Hinblick auf vermutete Reaktionen wesentlich kritischer. Ein großtechnisches Verfahren zur Herstellung von Aldehyden (Ketonen) ist die durch Kupfer katalysierte Wasserstoffabspaltung an primären (sekundären) Alkoholen bei einer Temperatur von etwa 300°C [CHR77].



Bei Zimmertemperatur zeigte sich hier ein ähnlicher Effekt wie beim Molsieb. Es wurden keine Nebenreaktionen festgestellt und etwa 80 ml(C₂H₅OH_{fl.})/kg Reinigermaterial adsorbiert. Diese Adsorption wird wahrscheinlich durch die molsiebähnliche Struktur des Katalysatorträgers verursacht. Um die Aufnahmekapazität für Sauerstoff zu verbessern, wurde die Temperatur des Reinigers langsam erhöht. Ab etwa 120°C wurden mit dem Gaschromatographen zusätzliche Gaskomponenten beobachtet (Abb. 7.2). Die unerwünschten Nebenprodukte stammen wahrscheinlich aus den erwarteten Dehydrierungsreaktionen.

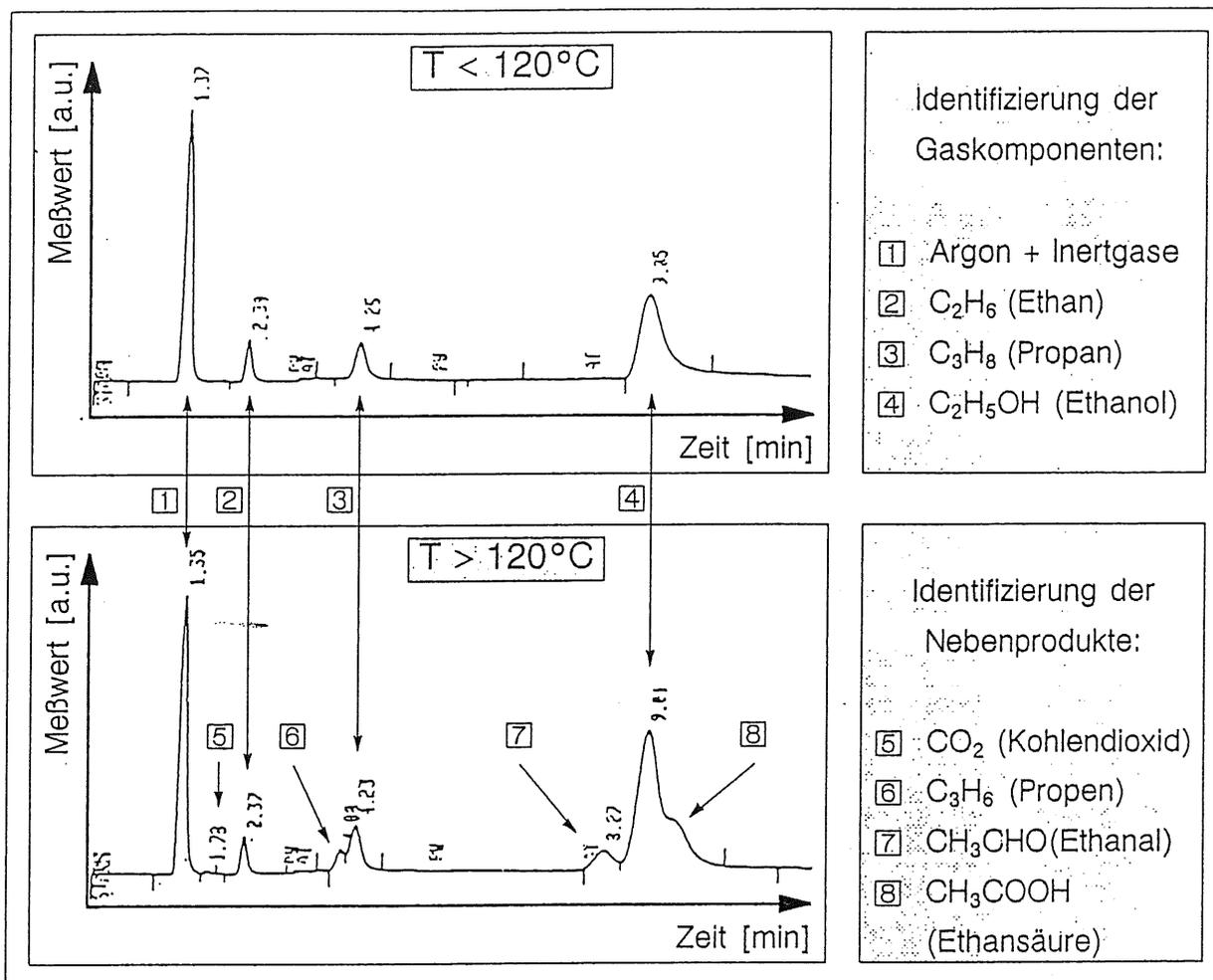


Abb. 7.2: Chromatogramme von ethanolhaltigem Kammergas nach passieren des Kupfer-Katalysators R 3-11 aus [KEM90], Identifizierung der Nebenprodukte nach [ETI93]

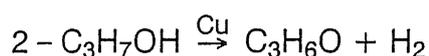
Bei einer Katalysatortemperatur von unter 120°C wurden anschließend Langzeitversuche im geschlossenen Kreislauf durchgeführt. Um den späteren Einsatzfall möglichst realistisch zu simulieren, war eine Proportionalkammer mit Wänden aus $50\ \mu\text{m}$ dicker Mylarfolie angeschlossen, deren Oberfläche etwa $4\ \text{m}^2$ beträgt. Durch Diffusion gelangte ständig Sauerstoff aus der Umgebungsluft in das Gasvolumen dieser Kammer. Da weder unerwünschte Nebenprodukte meßbar waren noch die Kammerfunktion beeinträchtigt wurde, konnte die Verwendbarkeit des Reinigungsverfahrens mit Ethanol abgesichert werden [KEM90]. Um auch bei kurzfristigen höheren Sauerstoffeinträgen die Temperatur unter 120°C halten zu können, wurde für den Betrieb bei H1 eine Nominaltemperatur von $(80 \pm 5)^\circ\text{C}$ für einen automatischen Reinigerbetrieb festgesetzt. Hierdurch erniedrigt sich die Aufnahmekapazität von maximal möglichen $50\ \text{l}(\text{O}_2)/\text{kg}$ auf ungefähr $20\ \text{l}(\text{O}_2)/\text{kg}$.

b) Reiniger mit 2-Propanol

Im Rahmen einer weiteren Diplomarbeit [ETI93] wurde das Verhalten der Reiniger mit 2-Propanoldampf untersucht. Bei denselben Ausgangsbedingungen wie unter a) (Regeneration/Zumischen bei Raumtemperatur) ergaben sich folgende Resultate.

Beim Molsieb 3A wurde eine Aufnahmekapazität von 50 ml(C₃H₇OH_{fl.})/kg gemessen. Weder beim normalen Betrieb noch nach Erhitzen und Betreiben des Molsiebs in Gegenflußrichtung, konnten unerwünschte Nebenprodukte nachgewiesen werden.

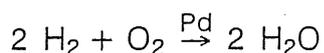
Der Kupfer-Katalysator hatte eine Aufnahmekapazität von 75 ml(C₃H₇OH_{fl.})/kg. Nach der Sättigungsphase wurden sofort zwei weitere Gase mit dem Gaschromatographen detektiert. Diese Gase – Wasserstoff und Propanon (Aceton) – stammen aus der katalytischen Dehydrierung von 2-Propanol:



Für eine weitere Oxidation zu Wasser und Kohlendioxid ließen sich keine Anzeichen finden. Da die Wirkung von Aceton auf das Kammerverhalten einerseits und auf die zu dem Bau verwendeten Materialien andererseits nicht bekannt war, konnte der Kupfer-Katalysator nicht zur Sauerstoffentfernung in propanolhaltigen Gasgemischen eingesetzt werden.

Bayer Katalysator VP¹ OC 1063

Daraufhin wurde nach einem neuen Katalysatormaterial gesucht. Nach [ALL80] sind die Metalle der 8. Nebengruppe des Periodensystems wie Nickel, Palladium und Platin wesentlich schlechter zur Dehydrierung von Alkoholen geeignet als Kupfer oder Messing. Bei Nachfragen in der chemischen Industrie erhielten wir eine Probe Palladium-Katalysator, die uns zu Testzwecken zur Verfügung stand. Dieser "Bayer Katalysator VP OC 1063" soll in der Praxis zur Sauerstoffentfernung aus Wasser eingesetzt werden. Ein Einsatz bei Gasen und Gasgemischen wurde bis dahin nicht untersucht, sollte aber prinzipiell möglich sein [BAY89]. Es handelt sich hier um ein kugelförmiges, niedrig vernetztes Polymer auf Divinylbenzol/Polystyrol-Basis mit makroporöser Struktur. Das Polymer enthält tertiäre Ammoniumgruppen und ist mit etwa 1 g Palladium pro Liter Material dotiert [BAY00]. Die katalytische Aktivität des Katalysators beruht auf der Fähigkeit, Wasserstoff auf dem fein verteilten Palladium zu adsorbieren, um damit die folgende Reaktion zu ermöglichen:



Das entstehende Wasser kann anschließend wieder mit einem Molekularsieb aus dem Gemisch entfernt werden. Die typische Aufnahmekapazität beträgt hier etwa 6 mg(O₂)/l Katalysator, die zur Reduktion von 48 mg Sauerstoff ausreicht. Im Vergleich mit den oben erwähnten Katalysatoren ist hier die Sauerstoffkapazität mit 0,05 l(O₂)/kg deutlich geringer. Diese Kapazität ist nahezu unabhängig von der Flußrate und im erlaubten Temperaturbereich von -10°C bis +120°C konstant. Nach einiger Zeit muß der Katalysator durch Zufuhr von Wasserstoff wieder regeneriert werden. Der Vorteil dieses Katalysators ist,

1. VP = Versuchs-Produkt, Abk. der Fa. Bayer AG

daß in keinem Betriebszustand die Temperatur erhöht werden muß und die Regeneration sehr einfach ist.

Nach einer Sättigung mit Wasserstoff wurde der Palladium-Katalysator mit Argon/2-Propanol-Gemisch durchströmt. Im Gegensatz zu allen anderen untersuchten Reinigern wurde keine meßbare Alkoholadsorption registriert, was auf die fehlende Molsiebeigenschaft des Trägermaterials zurückzuführen ist. Leider wurde auch hier die Produktion von Propanon beobachtet. Der auf den Alkohol bezogene Ketonanteil war jedoch deutlich geringer als beim Kupfer-Katalysator. Wasserstoff konnte nicht nachgewiesen werden, da dieser wahrscheinlich am Palladium sofort wieder angelagert wird. Ein Einsatz dieses Reinigers erscheint dennoch sinnvoll, da das unerwünschte Propanon mit Hilfe eines nachgeschalteten Molekularsiebes 3A wieder ausgefiltert werden kann. Für den praktischen Einsatz sind aufgrund der geringen Sauerstoffkapazität des Katalysators und der geringen Kapazität des Molsiebs ($150\text{ml}(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_{\text{fl.}})/\text{kg}$ [ETI93]) die Reinigermodule entsprechend groß zu dimensionieren.

c) Reiniger mit Wasser

Die in den Jet-Kammern benötigte Wasserkonzentration entspricht einer Taupunkttemperatur (-15°C), die deutlich unterhalb der Umgebungstemperatur (-20°C) liegt. Somit sollte in den Reinigern keine Kondensation stattfinden können. Für eine Funktionseinschränkung des Katalysators R 3-11 beim Einsatz von Gasmischungen mit gasförmigem Wasseranteil gibt es keinen Hinweis [BAS71]. Ebenso ist die Verwendung des Palladium-Katalysators unkritisch, da er gerade für den Einsatz mit flüssigem Wasser entwickelt wurde [BAY00]. Die verwendeten Molsiebe vom Typ 3A und 5A besitzen beide eine große Kapazität zur Aufnahme von Wasser und es stellt sich die Frage, ob bei einem hohen Wassergehalt die Reinigerkapazität für Fremdbestandteile erhalten bleibt. Diese Frage kann bejaht werden, da einerseits die Wassermoleküle aufgrund ihrer Größe nicht alle "großen" Poren im Molekularsieb besetzen können und andererseits die Anzahl von erwarteten Verunreinigungen sehr klein ist ($\ll 1$ ppm). Daher sollten die Reiniger nach einer Sättigung mit Wasserdampf weiterhin ihren Zweck erfüllen. Diese Reiniger wurden deshalb ohne weitere Voruntersuchungen in wasserdampfhaltigen Gasgemischen eingesetzt.

7.3 Aufbau und Funktion der H1-Reinigeranlagen

Für alle vier verschiedenen geschlossenen Kreisläufe der H1-Gassysteme wurden Reinigereinheiten gebaut. Aus Gründen der Kompatibilität sind alle Einheiten identisch aufgebaut. Zur Aufnahme der Reinigermaterialien stehen pro Einheit zwei gewalzte Edelstahlzylinder [WHI01] mit einem Fassungsvermögen von 1 Gal_{am.} (= 3,785 Liter) zur Verfügung. In der Grundausstattung ist der erste Behälter mit 2 kg Kupfer-Katalysator [BTS01]¹ gefüllt. Der zweite Behälter enthält 1,5 kg Molsieb 3A sowie 0,5 kg Molsieb 5A [M3A5A]. Um Staubpartikel des Reinigermaterials zurückzuhalten, sind beide Zylinderenden mit einer Sinterplatte [CAJ01] ausgestattet. Die Behälter sind in aufrechter Position montiert und am Außenmantel mit einer Heizwicklung versehen. Zur Temperaturmessung ist jeweils ein PT100-Meßwiderstand auf jeden Zylinder geklebt. Eine Isolierschicht aus zentimeterdicker Steinwolle mit Aluminiumkaschierung umhüllt die Anordnung.

Der Aufbau der mechanischen Installationen zum Betrieb der Reinigereinheiten wird am Beispiel von Gassystem II erläutert. Hier sind zwei geschlossene Kreisläufe zum voneinander unabhängigen Betrieb der beiden zentralen Jetkammern mit Reinigerpaaren zu versehen. Da im Normalfall beide Kammern von einem Kreislauf versorgt werden und der zweite als Reserve dient, sind hier insgesamt nur zwei Reinigereinheiten (4 Behälter) in einem gemeinsamen Schrank installiert. Das Photo Abb. 7.3 zeigt alle Racks von Gassystem II, wobei der erwähnte Schrank als zweiter von rechts abgebildet ist. In der Rückansicht (Abb. 7.4) sind die Reinigerbehälter ganz links gut zu erkennen. Weiterhin sichtbar sind die großen Vorratsbehälter ("Barrel") in den benachbarten Schränken, die Leitungen zur Gasverbindung oben an den Racks sowie die Kabelkanäle mit dem internen Bussystem (vergl. Kap.4.5). Die Reiniger sind im geschlossenen Kreislauf zwischen dem Vorratsbehälter und der zuschaltbaren Station zur Beimischung von Additiven angeordnet (vergl. Abb. E8, E9). Mit Hilfe des "internal bypass" kann das Gas im System mehrfach vorgeeignet werden.

1. Der "BTS-Katalysator R 3-11" (Fa. Merck); identisch mit dem Bayer-Katalysator R 3-11

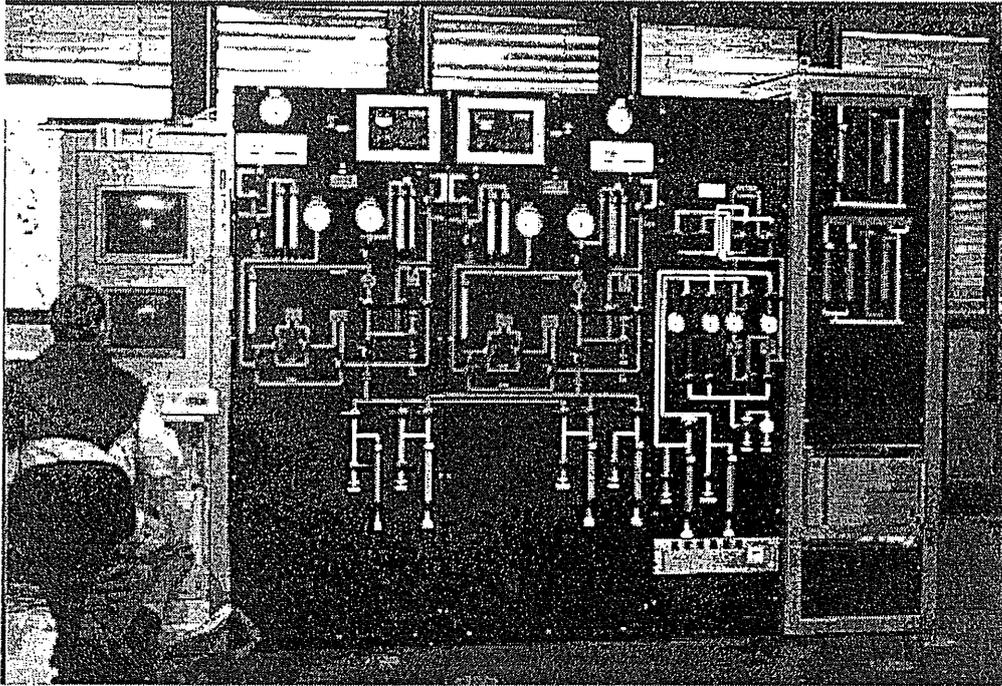


Abb. 7.3: Gassystem II (v.l.): Elektronik, Kreisl. 1, 2, Reiniger, Trailer (Photo H. Gräßler)

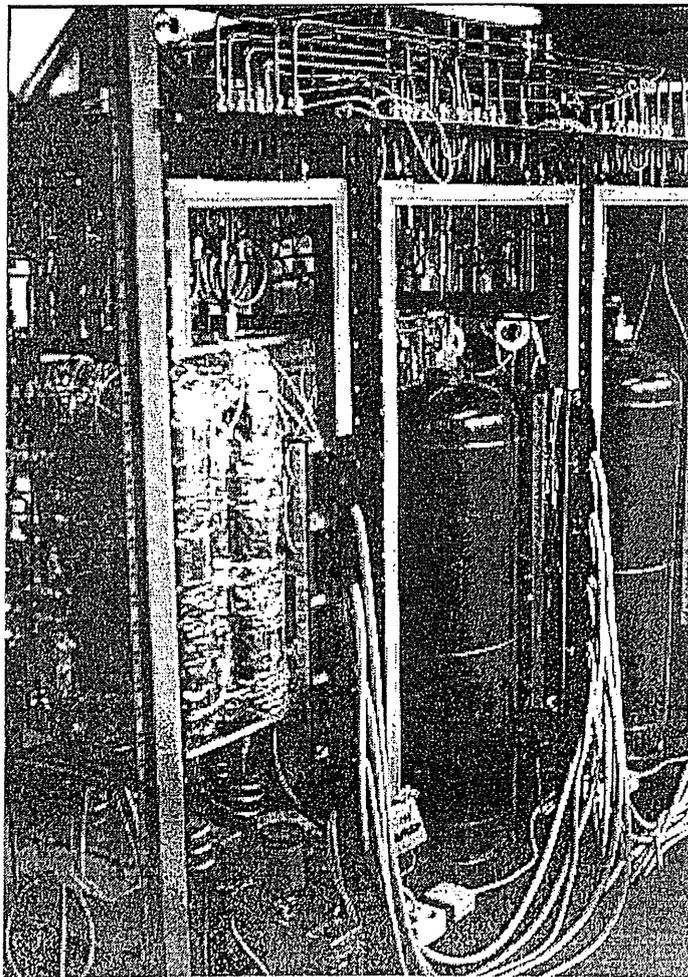


Abb. 7.4: Rückansicht Gassystem II (v.l.): Reiniger, Kreisl. 2, 1 (Photo H. Gräßler)

Der Verlauf der Gasflüsse innerhalb des Reinigerracks und die peripheren Installationen sind im Rohrleitungsplan (Abb. 7.5) eingezeichnet. Das Kammergas des ersten Kreislau- fes gelangt während des normalen Reinigerbetriebs über das Umschaltventil *from Cir.1* zunächst in den Behälter mit dem Katalysatormaterial ("Deoxo®")¹ und dann über das Ventil *V9-3* ins Molsieb. Danach passiert das gereinigte Gas ein Feinstaubfilter [BAL01], bevor es über das Ventil *to Cir.1* in das Kreislauftrack übergeben wird. Während dieser Zeit sind alle anderen mit diesen Leitungen verbundenen Ventile geschlossen. Der "normale" Flußverlauf in Kreislauf 2 ist ganz analog.

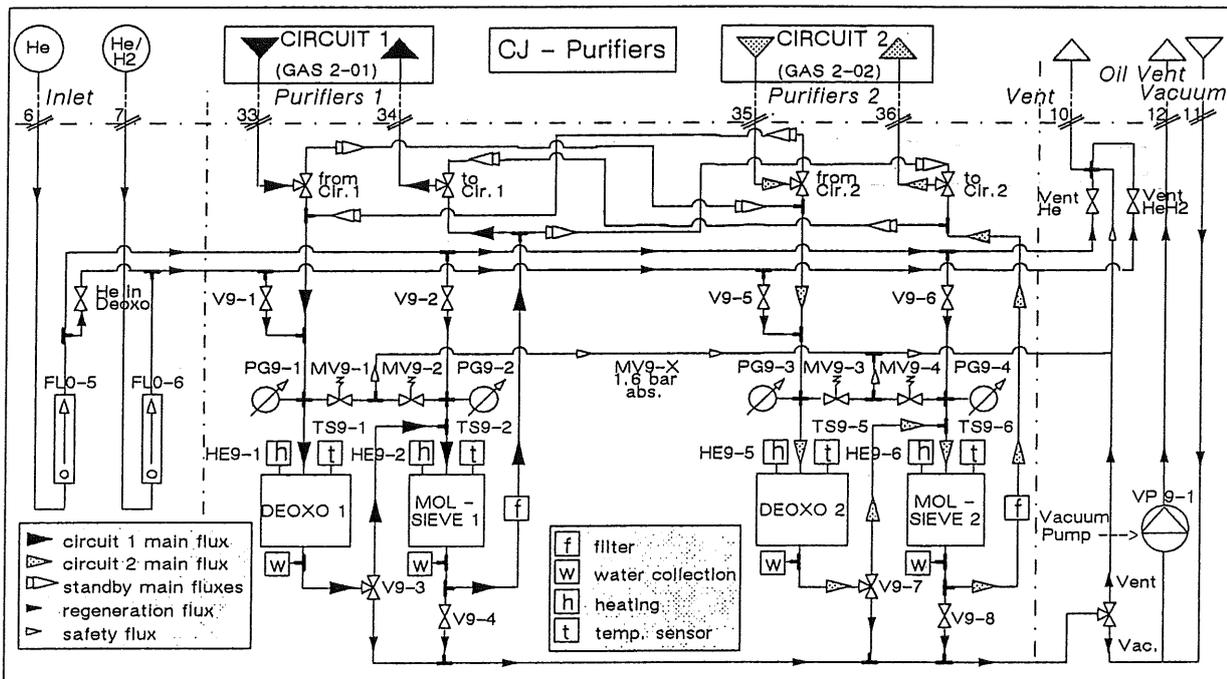


Abb. 7.5: Rohrleitungsplan der Reinigereinheiten von Gassystem II (vergl. Abb. E11)

Zur Regeneration der Reiniger werden zuerst die Ventile zum Anschluß des Kreislaufes geschlossen oder direkt zum zweiten Reinigerpaar umgeschaltet ("standby main flux"). Dann wird durch Öffnen des Ventils *V9-4* und Umschalten von *V9-3* der Überdruck der Behälter über die Auslaßleitung *Vent* abgelassen ("regeneration flux"). Mit Helium wird danach über den Schwebekörperflußmesser *FLO-5* und die entsprechenden Ventile (*V9-2*, *He in Deoxo*, *V9-1*) das meist brennbare Kammergas aus den Reinigern gespült. Mit der Vakuumpumpe *VP9-1* können die Reiniger anschließend evakuiert werden. Adsorption ist definiert als: "Partialdruckerhöhung der Gaskomponente an einer festen Oberfläche". Somit ist die Aufnahmefähigkeit an den Partialdruck des Gases im Reiniger- volumen gekoppelt. Daher wird durch diese Druckerniedrigung ein großer Anteil der adsorbierten Gase wieder freigesetzt [WIR00]. Danach werden die Reiniger geheizt und die weitere Regeneration mit Helium (Molsieb) bzw. über *FLO-6* Helium/Wasserstoff (Katalysator) durchgeführt (vergl. 7.1). Die auskondensierten Komponenten können hierbei im Wasserablaß "w" gesammelt werden. Abschließend werden die Reiniger unter geringem Heliumfluß abgekühlt und wieder evakuiert.

1. Deoxo® = Handelsname für katalytische Sauerstoffentferner der Fa. Engelhard Ltd.

Beim Wiederanschließen des Kreislaufes ist darauf zu achten, daß die Reiniger erst mit Kammergas gespült werden. Diese Konditionierung dient der Sättigung und ist erforderlich, da neben den Verunreinigungen auch einige Komponenten des Kammergases (z.B. Propan) vom regenerierten Material adsorbiert werden. Der Spülvorgang muß solange fortgeführt werden, bis ein Gleichgewicht aller Gemischkomponenten zwischen ihrer adsorbierten und der gasförmigen Phase erreicht ist. Die Dauer dieses Vorgangs hängt von vielen Parametern ab und ist praktisch nicht berechenbar. Daher ist es zweckmäßig, mit geeigneten Meßgeräten die Gaszusammensetzung zu überprüfen. Der Vorteil einer gewissen Menge adsorbierten Gases ist, daß die im normalen Betrieb vorkommenden kleinen Konzentrationsänderungen im Gasgemisch durch De- oder Adsorption vom Reinigermaterial ausgeglichen werden.

Zum Abschluß werden die restlichen der in Abb. 7.5 dargestellten Komponenten vorgestellt. Die Heizungen "h" tragen die logischen Namen *HE9-X* und die zugehörigen Temperatursensoren heißen *TS9-X*. Die verwendeten Teile und die programmkontrollierten Regelungen sind identisch mit der Temperatursteuerung der Additivstation (vergl. Kap. 5.4). Zur Sicherheit vor Überdruck ist an jedem der abschottbaren Behälter ein mechanisches Federventil *MV9-X* installiert, das bei einem Absolutdruck von etwa 2,6 bar voll öffnet ("safety flux"). Ursache für eine Druckerhöhung bei geschlossenen Ventilen kann z.B. ein Temperaturanstieg infolge defekter Heizregelung oder die exotherme Reaktion während der Regenerationsphase sein. Um den aktuellen Druck ablesen zu können, sind an jedem Behälter mechanische Manometer *PG9-X* installiert.

Der Aufbau und die Funktionsweise des Reinigeracks für Gassystem I ist im wesentlichen identisch zu der oben beschriebenen Anlage für Gassystem II. Der Rohrleitungsplan hierzu ist dem Anhang zu entnehmen (Abb. E4). Die radialen Driftkammern und die MWPCs zusammen mit den Planaren Driftkammern werden mit zwei unterschiedlichen Gasgemischen von getrennten, geschlossenen Kreisläufen versorgt. Deshalb wurde hier zusätzlich ein drittes Reinigerpaar ("Standby Purifiers") installiert. Bei erschöpfter Kapazität eines der beiden Reinigerpaare kann einfach umgeschaltet werden, ohne die Gasversorgung im geschlossenen Kreislauf zu unterbrechen.

7.4 Ergebnisse der Gasreinigung

Es konnte erstmalig gezeigt werden, daß eine Reinigung von Kammergasen mit Ethanol-dampfungabe in einem geschlossenen Gaskreislauf technisch durchführbar ist. Ohne Vortrennung ist ebenso eine Reinigung von Kammergasen mit 2-Propanol-Zusatz realisierbar. Weiterhin sollte Wasser als Additiv zum Gasgemisch in den beschriebenen Anlagen keine Probleme verursachen. Die wichtigsten Resultate und Parameter der für die H1-Gassysteme untersuchten Reiniger werden aus den vorangegangenen Abschnitten in Tab. 7.2 zusammengefaßt.

Reiniger	Adsorption von flüssigem			Betriebsparameter					
	Ethanol	2-Prop.	Propanon	Reinigen		Regeneration		Kapazität	
	[ml/kg]	[ml/kg]	[ml/kg]	T[°C]	Effekt	T[°C]	Gas	[l/kg]	für
Molsieb 3A	40	50	150	20	Sieb	< 200	He	< 300	H ₂ O
Cu – Kat.	80	75	erzeugt-	80	Ads.	< 200	He/H ₂	- 20*	O ₂
Pd – Kat.	n.meß.	n.meß.	erzeugt-	20	Kat.	< 120	H ₂	- 0,05	O ₂

* Bei T>200°C ca. 50l(O₂)/kg; bei Raumtemperatur ca. 5 l(O₂)/kg

Tab. 7.2: Betriebsparameter und Meßergebnisse ausgewählter Reiniger

a) Gasreinigung mit Ethanolzusatz für MWPCs + Planare

Das H1-Gassystem mit einer original H1-Vorwärts-Vieldrahtproportionalkammer und einer planaren Driftkammer wurde erstmals 1989 im RAL betrieben. Eine Reinigung des Gases Argon/Propan 90/10 mit einem Ethanolanteil von etwa 1% im geschlossenen Kreislauf wurde ab Mai 1990 durchgeführt. Beim ersten Füllen des kompletten Systems zeigte sich, daß Propan in starkem Maße vom Molsieb 5A adsorbiert wurde. Nach einer Gemischkorrektur arbeitete die Anlage einwandfrei, und es konnten wie bei den Vorversuchen keine unerwünschten Nebenprodukte nachgewiesen werden. Der Feuchtigkeitsgehalt des Kammergases konnte innerhalb eines Tages von -2°C (> 5.000 ppm) auf einen Wert von -15°C (1.600 ppm) erniedrigt werden, und die Sauerstoffkonzentration verringerte sich auf unter 60 ppm. Unter diesen Bedingungen konnte am folgenden Tag Hochspannung an die Kammerelektroden gelegt werden und die Kammern funktionierten erwartungsgemäß gut. Die gemessene Sauerstoffkonzentration betrug in der Folgezeit etwa 40 bis 60 ppm, da durch unvermeidliche Lecks und Diffusion Luft in die Kammern eindringen konnte. Die Sauerstoffkonzentration blieb auch nach dem Einbau in das H1-Experiment stets gleich bei Werten von unter 100 ppm. Weiterhin konnten in den Gasanalysen nie unerwünschte Nebenprodukte aus der Reaktion des Ethanols mit dem Kupfer-Katalysator nachgewiesen werden.

Die Funktion der Molsiebe wurde innerhalb des Gassystems kontinuierlich von je einem Hygrometersensor vor und nach den Reinigern gemessen. Das Gas aus den Kammern hatte beim ersten Einsatz im RAL einen typischen Feuchtegehalt von 1.000 – 1.500 ppm und nach Passieren des Reinigers wurden 50 – 100 ppm gemessen. Trotz dieses hohen Reinigungsgrades konnte die Wasserkonzentration nicht wesentlich erniedrigt werden. Die Leckrate der Kammern konnte anhand des Sauerstoffwertes abgeschätzt werden

und war viel zu klein, um einen solch hohen Wassergehalt zu erklären. Daher wurde zunächst vermutet, daß im flüssigen Alkohol der Zumischanlage Wasser gelöst war, welches beim Verdampfen entsprechend viel Wasserdampf produziert. Die Verwendung eines Alkohols mit besseren Spezifikationen, erneutes Regenerieren der Reiniger, ein Betrieb mit dem internen "bypass" oder die Verwendung einer Gasmischung ohne Additiv konnten den Wassergehalt jedoch nicht wesentlich verringern.

Auch nach jahrelangem Betrieb der Kammern mit reinem Kammergas im geschlossenen Kreislauf ist der Wassergehalt noch erstaunlich hoch. Die gemessene Feuchte vor und hinter den Reinigern ist in Abb. 7.6 für die Runperiode 1993 dargestellt. Im oberen Diagramm sind die Tagesmittelwerte der gemessenen Taupunkte und in den Diagrammen darunter ist der in ppm umgerechnete Feuchtegehalt über der Zeit aufgetragen¹. Der vom Hersteller angegebene Fehler des Hygrometers beträgt $\pm 1^\circ\text{C}$ und ist kleiner als die Symbolgröße im oberen Diagramm. Der resultierende asymmetrische Fehler im Feuchtegehalt ist in den unteren Diagrammen als durchgezogene Linie dargestellt. Wie aus den gestrichelten Linien zu ersehen ist, kann der Fehler durch Luftdruckschwankungen vernachlässigt werden.

Im Zeitraum Tag 430 bis Tag 532 (5.03.–15.06.93) gab es einige Unterbrechungen des geregelten Betriebs, die durch gerissene Drähte in der Zentralen Jetkammer 1 verursacht wurden. Der normale Kammerbetrieb wurde mehrmals unterbrochen und wegen der Reparatur mußten alle Tracking-Kammern von den Gassystemen getrennt werden. Dieses erklärt die starken Schwankungen des Wasseranteils und den hohen Feuchtegehalt um den Tag 480. Daraufhin wurden sicherheitshalber am Tag 550 (3.07.93) beide Reiniger regeneriert. Sieht man von den Unregelmäßigkeiten ab, so ergibt sich eine stetige, aber langsame Feuchtigkeitsabnahme im aus den Kammern zurückfließenden Gas (=vor den Reinigern). Bei normalem Betrieb sinkt der Taupunkt *HM1-2* mit einer Steigung von $-0,046^\circ\text{C} / \text{Tag}$ nahezu konstant. In der gesamten Periode sinkt der Taupunkt von -23°C auf -33°C , was einer Reduktion der Feuchte von 760 ppm auf 275 ppm entspricht. Die Leistungsfähigkeit der Molsiebe kann aus den Kurven des Sensors *HM1-1* und aus dem unteren Diagramm abgelesen werden. Der Taupunkt des Gases, mit dem die Kammern versorgt wurden, lag in der gesamten Periode unter -42°C (100 ppm). Nach der Regeneration (Tag 550) fiel der Feuchtegehalt nach den Reinigern bis zum Ende der Runperiode wieder ab, was auf den niedriger werdenden Wassergehalt des Gases aus den Kammern zurückzuführen ist.

Ein interessantes Maximum zeigte sich im eigentlich homogenen Kurvenverlauf am Tag 631 (22.09.93). Zur genaueren Analyse ist der Verlauf in den oberen beiden Diagrammen mit einem Meßwert/Stunde herausvergrößert. Gegen Mittag des 21.9.93 fiel die Kühlung der Tracking-Detektoren für 12 Stunden aus, und das Gas in den Kammern erwärmte sich von etwa 30°C auf bis zu 52°C (vergl. Abb. 6.4). Als Folge dessen wurde von den Kammeroberflächen Wasserdampf abgegeben, der im Gas zu einem Anstieg des Taupunktes von $-31,2^\circ\text{C}$ auf -26°C (332 ppm \rightarrow 565 ppm) führte. Im selben Zeitraum kann nach den Reinigern keine Abweichung der Feuchte festgestellt werden. Diese Störung zeigt eindrucksvoll wieviel Wasser allein in den Kammermaterialien gespeichert ist.

1. Zur Datenaufnahme und Lücken in den Diagrammen vergl. Text zu Abb. 5.11

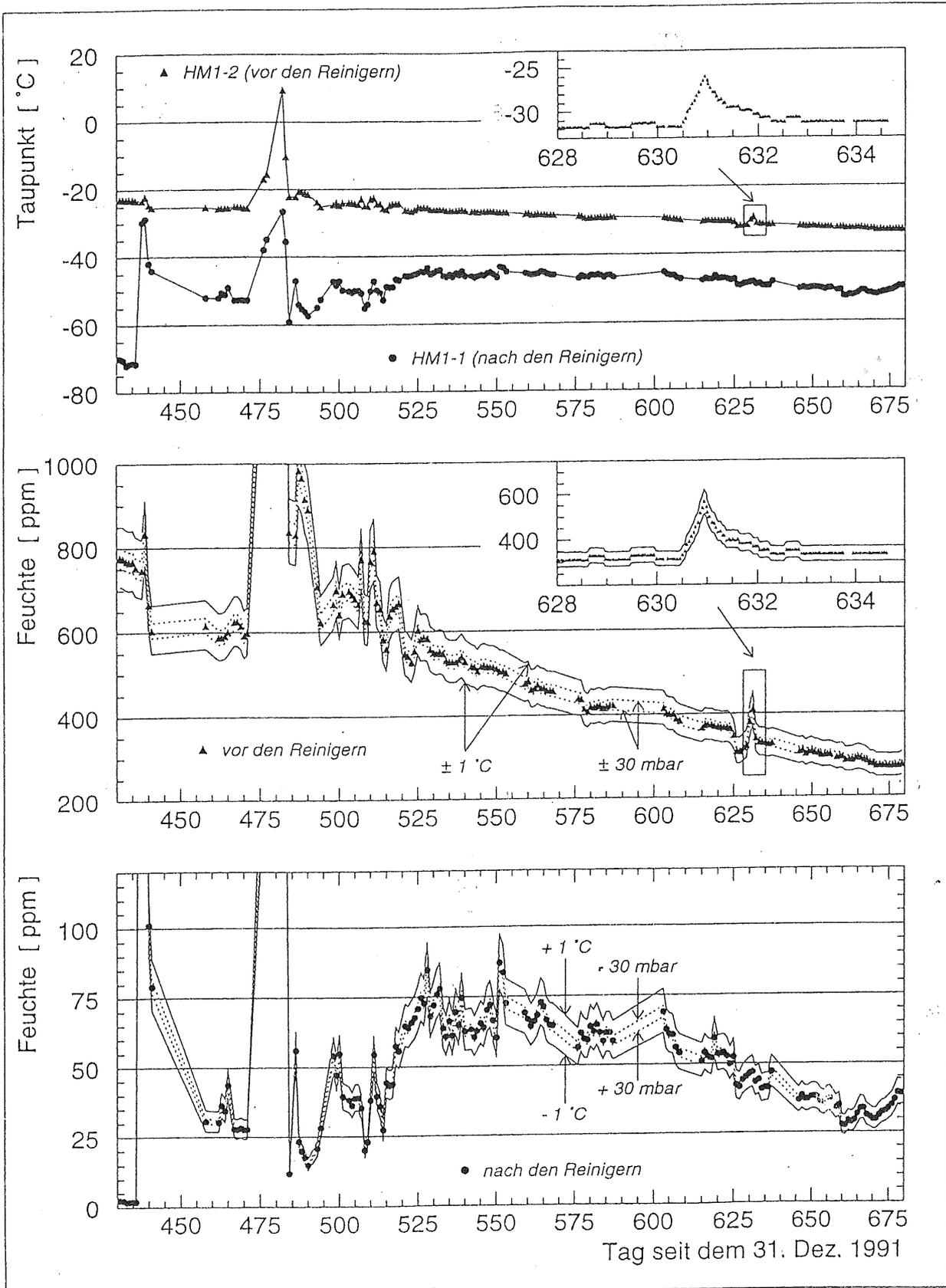


Abb. 7.6: In der H1-Runperiode 1993 gemessener Wassergehalt vor und nach den MWPCs und Planaren Kammern

b) Gasreiniger und Radiale Driftkammern

Das Gasgemisch für diese Forward-Tracking-Kammern war von Beginn an Argon/Ethan mit wechselnden Sollverhältnissen von 0,48 bis 0,52. Die Kammern wurden seit 1990 im geschlossenen Kreislauf 2 des Gassystems I ohne Additive betrieben.

Wie bei den MWPCs und Planaren zeigten sich hier ähnliche Verhältnisse im gemessenen Sauerstoff- und Wasserdampfanteil. Als erste typische Konzentration wurden etwa 3.000 ppm (H_2O) und 200 ppm (O_2) gemessen. Der Feuchtegehalt nahm während der RAL-Testphase auf etwa 800 ppm ab und der Sauerstoffanteil pegelte sich bei 30 – 40 ppm ein. Hier wurde keine zusätzliche Flüssigkeit (Alkohol oder Wasser) im geschlossenen Kreislauf eingesetzt. Trotzdem blieb auch in diesem Fall der Wassergehalt bemerkenswert hoch. Auch nach der Testphase in Halle 5 (DESY) war die Sauerstoffentfernung mittels Kupferkatalysator unkritisch. Der gemessene Sauerstoffanteil war stets geringer als 100 ppm. Wie im vorigen Beispiel konnte auch hier trotz guter Reinigungswirkung der Wasseranteil im Gas aus den Kammern nur sehr langsam reduziert werden.

In Abb. 7.7 ist für die komplette Runperiode 1993 der gemessene Feuchtigkeitsverlauf in der gleichen Auftragsung wie in Abb. 7.6 dargestellt. In den beiden Abbildungen ist die Form der Taupunktkurven sehr ähnlich. Die gemessenen Wassergehalte in den Radial-Kammern und die nach den Reinigern liegen jedoch niedriger. So konnte der Taupunkt mit Hilfe der Molekularsiebe von anfänglich -27°C (520 ppm) auf -42°C (100 ppm) am Ende der Periode verringert werden. Im Zeitraum konstanter äußerer Bedingungen (Tag 550 bis Tag 650) betrug die mittlere gemessene Änderung der Taupunkttemperatur des Gases aus den Kammern etwa $-0.048^\circ\text{C} / \text{Tag}$. Die Auswirkungen des Ausfalls der Detektorkühlung sind auch in dieser Kammer deutlich zu erkennen (Tage 630–632). Der Taupunkt des Gases von den Kammern stieg von -41°C auf $-29,2^\circ\text{C}$ an, was einer Feuchteerhöhung von ca. 113 ppm auf 407 ppm entspricht. Die Abweichungen gegen Ende der Meßperiode wurden verursacht durch ein Spülen des Systems mit Argon (Abfall der Kurve) und das Einfüllen des neuen Gasgemisches Xenon/Ethan/Helium (Anstieg). Der Feuchtegehalt des die Kammern versorgenden Gases konnte mit Hilfe der eingesetzten Molekularsiebe unter stabilen äußeren Bedingungen bei nur 25 ppm gehalten werden. Aus dem Abstand der dargestellten Kurven kann auch hier die gute Funktionstüchtigkeit der Molekularsiebe abgelesen werden. Die wichtigsten Zahlen der Messungen des Feuchtegehaltes der Forward-Tracking-Kammern sind in Tab. 7.3 zum Vergleich zusammengefaßt.

Kammern	Meßstelle	Hygrometer log. Name	Taupunkt [$^\circ\text{C}$]	Feuchte [ppm]
MWPCs und Planare	von d. Kam./vor Rein.	HM1-2	-23 -> -33	760 -> 275
	zur Kam. / nach Rein.	HM1-1	-42 -> -53,5	100 -> 25
Radiale Driftkammern	von d. Kam./vor Rein.	HM2-2	-27 -> -42	520 -> 100
	zur Kam. / nach Rein.	HM2-1	ca. -52 bis -57	ca. 15 bis 30

Tab. 7.3: Zahlen zur Funktion der Molekularsiebe in Gassystem I für die Runperiode 1993

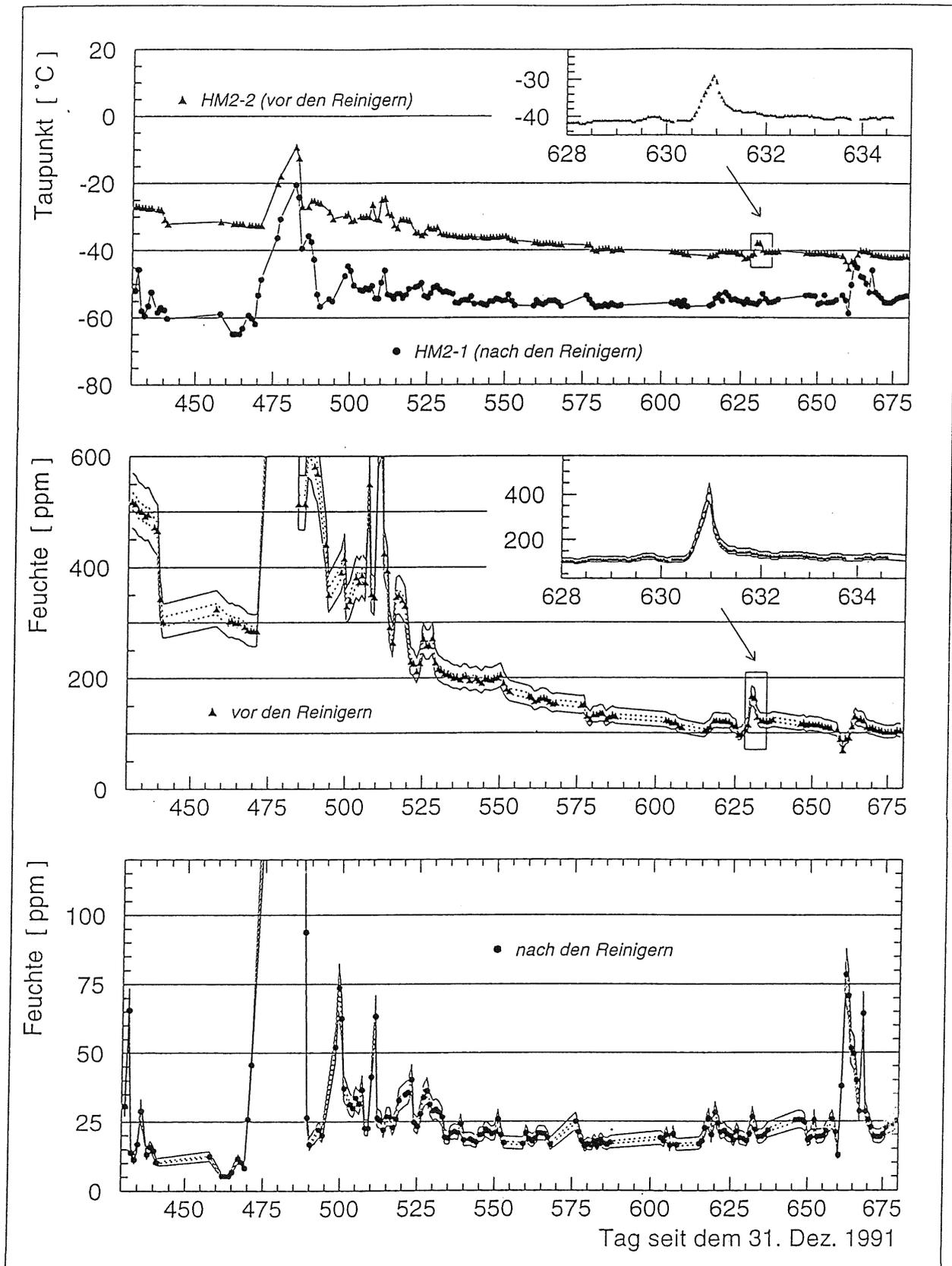


Abb. 7.7: In der Runperiode 1993 gemessener Wassergehalt des Gases vor und nach den Radialen Driftkammern

Die Funktionstüchtigkeit des Kupfer-Katalysators konnte auch hier nachgewiesen werden. Wegen des niedrigen Sauerstoffanteils wurde der Katalysator ohne Heizung bei Raumtemperatur betrieben. Diese Betriebsweise bietet zwar absolute Sicherheit vor Störungen der Temperaturregelung, reduziert aber die Sauerstoffaufnahmekapazität des Reinigers (vergl. Tab. 7.2). Die Reinigungswirkung reichte dennoch aus, um bis Mitte 1993 einen Sauerstoffanteil zwischen 30 und 50 ppm zu gewährleisten. Zu diesem Zeitpunkt wurde bewußt dieser Reiniger aus dem geschlossenen Kreislauf herausgeschaltet¹ und im folgenden Zeitraum wurden zusätzlich einige Liter Luft ins System eingefüllt. Diese Maßnahmen dienten dazu, den Sauerstoffanteil im Kammergas auf über 1.000 ppm zu erhöhen. Dieser Vorschlag wurde von den Kammerbetreibern gemacht, um die zunehmende Häufigkeit von Dauerentladungen an den Signaldrähten der Radialen Driftkammern zu reduzieren. Es erscheint jedoch fraglich, ob diese bewußte Inkaufnahme von Attachment die Energieauflösung der Kammer nicht negativ beeinflußt. Besonders in Bezug auf die zu messende Übergangsstrahlung erscheint Skepsis angebracht.

c) Reiniger und Zentrale Jetkammern

Die Kammern CJC1 und CJC 2 wurden ab Beginn des Jahres 1991 von den beiden geschlossenen Kreisläufen des Gassystems II versorgt. Das Gasvolumen der beiden Kammern beträgt zusammen mehr als 4 m³. In der Anfangsphase wurden die Kammern zunächst mit dem Vorgemisch Argon/Kohlendioxid/Methan 89,5/9,5/1 im offenen Kreislauf ohne Reiniger betrieben. Unter diesen Betriebsbedingungen betrug der typische Taupunkt des Gases aus der CJC 1 -47°C (56 ppm) und aus der CJC 2 -49°C (44 ppm). Die mittlere Sauerstoffkonzentration lag bei 40 ppm (CJC 1) bzw. 90 ppm (CJC 2). Der Unterschied in der Wasserkonzentration wurde durch einen systematischen Offset der beiden Feuchtemeßgeräte [PAN3A] hervorgerufen. Die gemessenen Konzentrationen sind in Wirklichkeit in beiden Kammern identisch. Bei der Bestimmung des absoluten Feuchtegehaltes muß bei diesen Meßgeräten mit einem Fehler von ±2°C gerechnet werden.

Im geschlossenen Kreislauf mit Reinigern, wurde ein Argon/Ethan-Gemisch 50/50 verwendet. Dabei wurden beide Kammern von einem der beiden Kreisläufe parallel versorgt. Im Gegensatz zu den Vorwärtskammern war es hier ohne weiteres möglich, die Sauerstoff- und die Wasserdampfkonzentration rasch auf geringe Werte zu erniedrigen. Bei der typischen Flußrate von (1,5 + 4,5) l/min wurden Taupunkte bis herunter zu -50°C (39 ppm) mit einem Gradienten von -1°C / Tag erreicht. Die kleinste mit den Molekularsieben erreichbare Wasserkonzentration kann nicht angegeben werden, da dem Kammergas im normalen Betrieb Wasserdampf zugemischt wurde.

Die Tagesmittelwerte des Taupunktes des Gases aus den Jetkammern sind für die Runperiode 1993 oben in Abb. 7.8 dargestellt. Die Meßwerte stammen vom Hygrometersensor HM1-3, der im geschlossenen Kreislauf nach den Kammern/vor den Reinigern installiert ist. Im mittleren Diagramm sind diese Meßwerte in Feuchte umgerechnet und darunter ist die Temperatur TS1-6 im Wasserbehälter der Additivstation dargestellt.

1. siehe hierzu Verrohrungsplan Abb. E4 , Ventile V_{byp.} an Deoxo 2

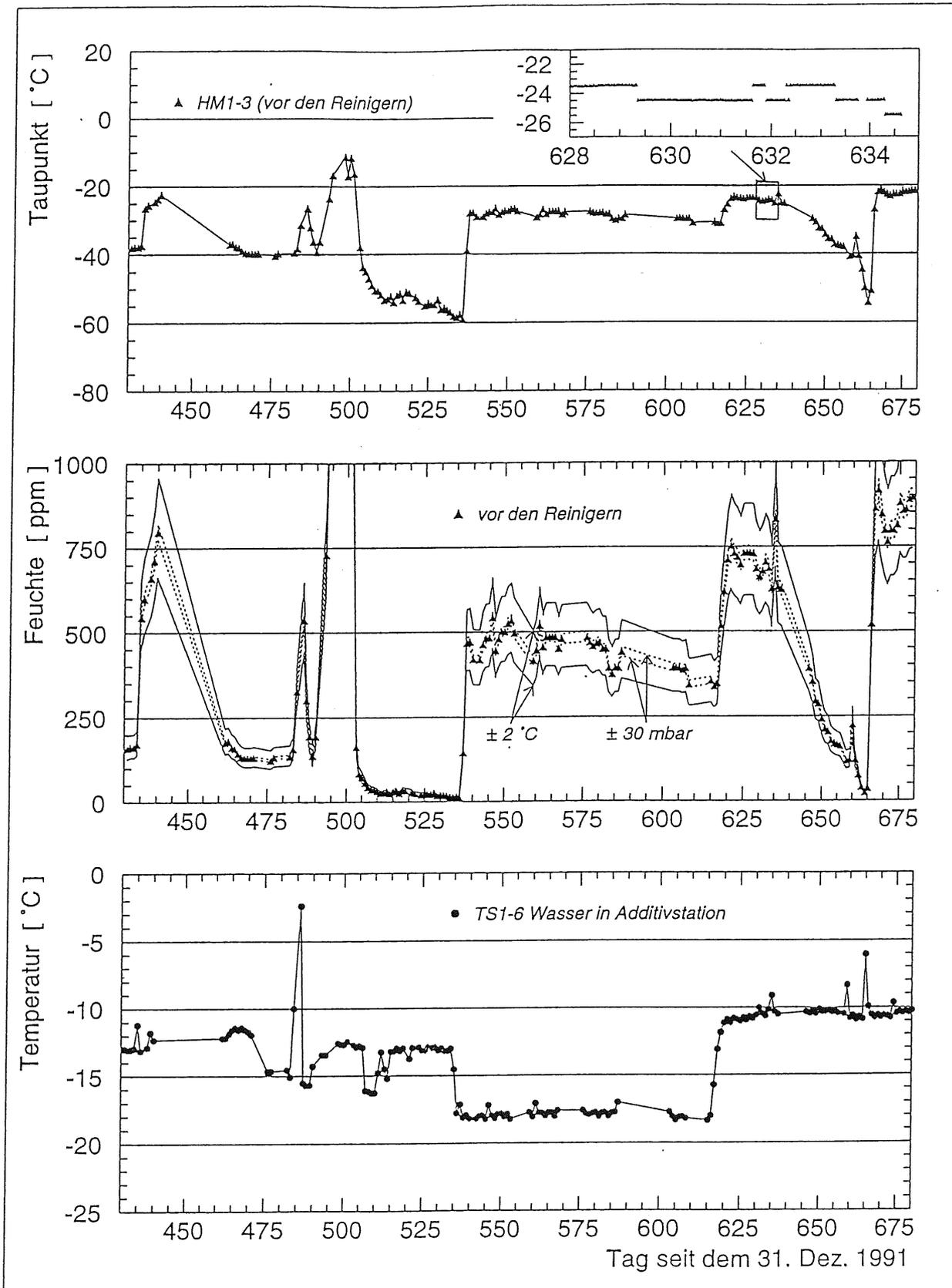


Abb. 7.8: In der Runperiode 1993 gemessener Wassergehalt des Gases aus den zentralen Jetkammern sowie die Temperatur des Wassers in der Zumischanlage

In diesem Gassystem wurden aufgrund der positiven Erfahrungen mit den Reinigern in Gassystem I, keine Feuchtesensoren hinter den Reinigern/vor den Kammern eingebaut.

Die Unregelmäßigkeiten zu Beginn der Runperiode sind auch in der Abb. 7.8 zu erkennen. Ab Tag 500 nimmt der Taupunkt exponentialförmig ab, weil kein Wasser mehr im Behälter der Zumischstation war (vergl. Kap. 5.4). Man sieht deutlich, daß die Molekularsiebe noch nicht komplett mit Wasserdampf gesättigt waren und deshalb konnte die Feuchte im geschlossenen Kreislauf noch unter 12 ppm (-59°C) reduziert werden.

Am 20.06.93 (Tag 537) wurde Wasser nachgefüllt und es zeigt sich ein konstanter Verlauf um etwa -28°C / 500 ppm. Bemerkenswert ist hier die Diskrepanz zwischen Additivtemperatur *TS1-6* und dem gemessenen Taupunkt *HM1-3*. Theoretisch sollten diese beiden Temperaturen nämlich gleich sein. Vermutlich wird durch die noch nicht mit Wasserdampf gesättigten Molekularsiebe soviel Wasser dem Kreislauf entzogen, daß bei der typischen Flußrate im Gasraum des Zumischbehälters nicht genügend schnell der zur Temperatur gehörende Dampfdruck erzeugt werden kann. Diese Vermutung sollte durch zusätzliche Messung des Wassergehaltes nach dem Reiniger sowie einer weiteren Messung nach der Additivstation verifiziert werden können.

Um den Wasseranteil zu erhöhen, wurde am Tag 617 (8.09.93) die Additivtemperatur erhöht. Wie zu erwarten stieg zeitgleich der gemessene Feuchtegehalt im Kammergas. Wegen des gewollt hohen Wasseranteils ist während des Ausfalls der Detektorkühlung kein Ansteigen des Taupunktes zu beobachten (vergr. Ausschnitt in Abb. 7.8, oben). Im Vergleich zu den Vorwärtskammern ist bei den zentralen Jetkammern das Verhältnis von Kammervolumen zu der inneren Oberfläche deutlich größer. Dieser Sachverhalt ist ein weitere Grund für das nicht meßbare Ansteigen der Wasserdampfkonzentration in den Jetkammern.

Im nachfolgenden Zeitraum war der Zumischbehälter wieder leer, so daß der Wasseranteil wieder auf unter 40 ppm (-50°C) abnahm. Nach dem Auffüllen des Wasserbehälters in der Zumischstation wiederholt sich der Feuchteanstieg wie nach dem Tag 537. Die Aufnahmekapazität für Wasser blieb also auch trotz monatelanger Wasserdampfzugabe erhalten.

8. Gasqualitätsüberwachung

Einführend wird die Notwendigkeit einer Qualitätsüberwachung der Kammergase dargestellt. Eine Auswahl physikalischer Methoden hierzu wird diskutiert und zusammenfassend bewertet. Hieraus wird ein Konzept zur Gasanalytik entwickelt, welches zur Aufstellung der aktuell am Experiment eingesetzten Instrumente führt. Abschließend werden experimentelle Ergebnisse und Betriebserfahrungen vorgestellt.

8.1 Motivation

Wie im 3. Kapitel gezeigt, ist die Meßleistung der individuellen Kammern unausweichlich an die verwendete Zusammensetzung der Gase gekoppelt. Die wichtigsten Meßgrößen der Kammern, die bei Änderung des Gasgemisches variieren sowie die sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Auswertung der Daten sind wie folgt:

Eine Abweichung in den Gasparametern beeinflusst über die Gasverstärkung direkt die Größe der gemessenen Kammerpulse. Die gemessenen Energiewerte werden aufgrund verschobener Kalibration fehlinterpretiert.

Zusätzlich führt eine Verringerung der Gasverstärkung dazu, daß von den festen Schwellwerten der Ausleseelektronik eine geringere Anzahl von Teilchendurchgängen registriert wird. Die Spurfindung wird ineffizient und der aus der Spurkrümmung zu berechnende Teilchenimpuls wird unzuverlässig.

Bei geänderter Driftgeschwindigkeit wird aus der gemessenen Driftzeit der falsche Ort rekonstruiert. Eine Anbindung der von dieser Kammer gemessenen Spursegmente an diejenigen benachbarter Detektoren ist nicht mehr möglich.

Um frühzeitig auf Gasveränderungen reagieren zu können, ist es notwendig, im Gassystem Qualitätsmonitore zu installieren. Ziel ist die Gewährleistung einer langzeitstabilen Komposition der Hauptkomponenten (Edelgas / Kohlenwasserstoff) und Additive (Alkohol, Wasser). Weiterhin müssen Verunreinigungen wie Stickstoff, Sauerstoff, etc. auf dem niedrigst möglichen Niveau gehalten werden.

Vielfach wird zur Beurteilung der Gasqualität eine kleine Gastestkammer hinter der Originalkammer im Gaskreislauf installiert. Durch den Einbau von zwei eng kollimierten radioaktiven Präparaten in definiertem Abstand können kontinuierlich Driftgeschwindigkeit und Energieauflösung gemessen werden. Trotz identischer Geometrie und gleicher zum Bau verwendeter Materialien, liefern die Kammern meist unterschiedliche Meßresultate.

Neben der Änderung der Gasqualität durch Vorgänge in der Hauptkammer ist die Ursache dafür die in Art und Dosis unterschiedliche Strahlenbelastung. Die Uneindeutigkeit der Aussage sowie fehlende finanzielle und personelle Mittel zur Realisation von mindestens

neun unterschiedlichen Anlagen führten zum Entschluß der H1-Tracking-Gruppe, keine Gastestkammern zu verwenden. Deshalb müssen zur Beurteilung der Gasqualität andere Analysemethoden herangezogen werden.

8.2 Physikalische Methoden zur Gasqualitätsüberwachung

Um die analytische Kontrollfunktion innerhalb des Konzepts der Gasversorgungsanlagen zu erfüllen, sind von den Analysegeräten diverse Randbedingungen zu erfüllen. So sollte die Messung selbst weder die Gasqualität in den geschlossenen Kreisläufen beeinflussen noch zu quantitativen Gasverlusten führen. Voraussetzung für einen Dauerbetrieb ohne manuelle Eingriffe ist eine langzeitstabile Kalibration der Meßeinrichtung. Weiterhin erforderlich ist die Möglichkeit einer automatischen Datenerfassung und Auswertung der Analyse. Die Meßanordnung darf kein zusätzliches Gefahrenpotential darstellen und muß sich in die Gassysteme integrieren lassen. Diese Anforderungen begrenzen die Anzahl zu diskutierender Meßverfahren. Nach Definition der Meßaufgabe lassen sich diese in drei Gruppen einordnen (vergl. Tab. 8.1). Die Geräte in Gruppe 1 messen die physikalischen Eigenschaften des Gesamtgasgemisches, während in Gruppe 2 die auf eine Gaskomponente selektiven Meßgeräte aufgeführt sind. Die Gruppe 3 enthält Analysegeräte im eigentlichen Sinn, d.h. hiermit ist eine qualitative und quantitative Bestimmung aller Komponenten des Gasgemisches möglich.

Gruppe	Gerät	physikalische Selektion	Messung (Nachweis) von
1 unspez.	Druckmesser	keine	Dichte
2 spezifisch	Fotometer (NDIR)	optische Filter	Druck/Strömung (div.)
	Spiegel-Hygrometer	Kondensation	Reflexionsgrad (H ₂ O)
	Al ₂ O ₃ -Hygrometer	Hygroskopie	Kondensatorladung (H ₂ O)
	O ₂ -Analysator	magn. Eigenschaften	Dipolmoment (O ₂)
	O ₂ -Brennstoffzelle	chemische Reaktion	Strom im Elektrolyt (O ₂)
3 Analyse	Massenspektrometer (MS)	elektromagnetische Felder (m/e Verhältnis)	Masse/Ladung
	IR-Spektrometer (FTIR)	selektive Lichtabsorption	z.B. Fotometer: Lichtintensität
	Gaschromatograph (GC)	Retention in "Trennsäule"	z.B. Wärmeleitfähigkeit

Tab. 8.1: Auswahl geeigneter Meßgeräte zur Gasqualitätsüberwachung

zu Gruppe 1:

Die physikalische Eigenschaft A (z.B. Zähigkeit η , Wärmeleitfähigkeit λ , ...) eines Gasgemisches ist anteilmäßig aus den Eigenschaften A_i der n -Komponenten zusammengesetzt.

$$A = f(c_i, A_i), \quad i = 1 \dots n$$

Ist der funktionale Zusammenhang eindeutig, Anzahl und die individuellen Eigenschaften

A_i der Komponenten bekannt, so lassen sich durch Messung von A in einem zweikomponentigen Gemisch die Konzentrationen c_i der einzelnen Komponenten berechnen. Der Aufwand wächst bei diesem Ansatz mit der Anzahl n der zu bestimmenden Komponenten, da dann zur Berechnung $n-1$ verschiedene Eigenschaften A bestimmt werden müssen. Die Empfindlichkeit der Bestimmung von A steigt bei großen Unterschieden der Werte A_i . Günstig ist weiterhin ein möglichst einfacher, linearer Zusammenhang in obiger Formel. Ein Beispiel hierfür ist die Bestimmung der Dichte $\rho_{ges.}$. Für eine Mischung idealer Gase ergibt sich nach Dalton:

$$\rho_{ges.} = \sum_{i=1}^n c_i \rho_i \quad (8.1)$$

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Gesamtdichte $\rho_{ges.}$ ist die Messung des Schweredruckes in einer vertikalen Gassäule der Höhe h ($dp = \rho \cdot g \cdot dh$; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$). Bei der in Abb. 8.1 gezeigten Anordnung wird durch zwei Differenzmessungen zwischen einem mit Kammergas gefüllten Rohr und der Umgebungsluft die Dichte ρ_G bestimmt.

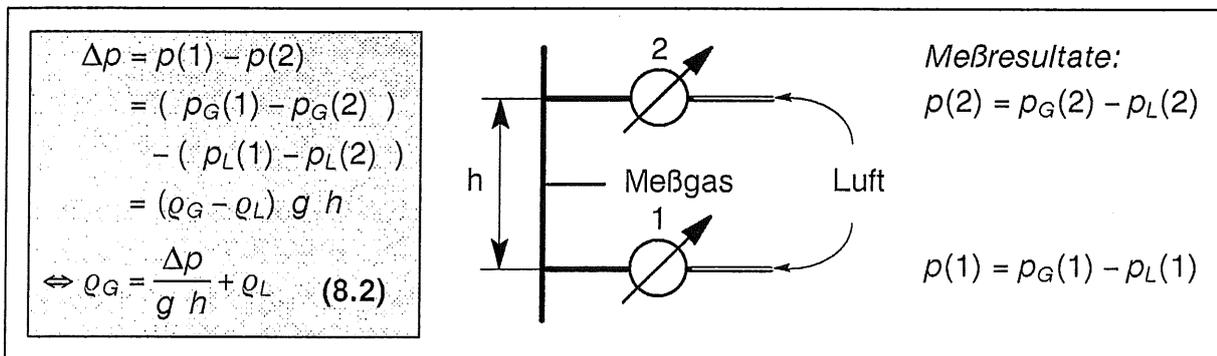


Abb. 8.1: Bestimmung der Gasdichte aus zwei Differenzdrücken

In der Praxis wird die Dichte einer zweikomponentigen Gasmischung meist indirekt durch Messung der Schallgeschwindigkeit v_s durchgeführt.

$$\rho = f(v_s) = \kappa \frac{p}{v_s^2}, \quad \text{mit: } \kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

Eine Möglichkeit zur Bestimmung von v_s mit Ultraschall ist in [HAL87] beschrieben und in [THO84] findet man die Anwendung des Prinzips der stehenden Welle.

zu Gruppe 2:

a) Nichtdispersives Fotometer-Prinzip

Der Name rührt daher, daß das zur Analyse in den Meßgasraum eingestrahlte elektromagnetische Teilspektrum keine Zerlegung in monochromatische Bestandteile erfährt [BINOS]. Unterschiedliche Atome und Moleküle haben spezifische Absorptionsspektren. Bei heteronuklearen Molekülen wird die Energie im IR-Bereich in quantisierten Übergängen der Vibrationszustände absorbiert. Die höheren Frequenzen im sichtbaren (VIS) und UV-Bereich werden umgesetzt in höhere Bindungszustände bis hin zu Übergängen der äußeren Elektronen, wodurch eine Absorption auch in homonuklearen und atomaren Gasen möglich wird [BEI69].

Nicht dispersive Infrarot Fotometer (NDIR) messen die Durchlässigkeit einer Gasprobe in einem für ein spezielles Gas ausgewählten Frequenzband. Wenn die übrigen Gaskomponenten in diesem ausgefilterten Bereich keine starke Absorption besitzen, kann so in einem Gasgemisch die Konzentration einer bestimmten Komponente gemessen werden. Die Beziehung zwischen Durchlässigkeit und Gaskonzentration wird durch das Lambert-Beersche Gesetz gegeben (Abb. 8.2).

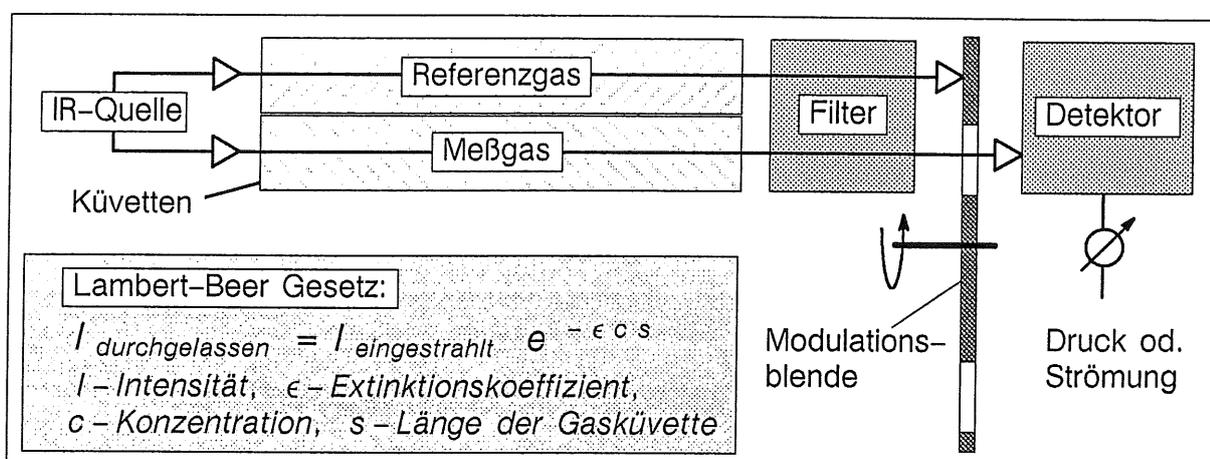


Abb. 8.2: Aufbau eines NDIR Meßgerätes

Hierzu erhältliche Meßgeräte benutzen als Strahler einen erhitzten Draht, dessen Strahlung normalerweise durch eine rotierende Blende zur Erzeugung eines Wechselsignals moduliert wird. Im Strahlengang befindet sich die mit Probengas durchflossene Meßküvette, deren Länge der maximal zu messenden Konzentration angepaßt ist. Der Ausschluß von Querempfindlichkeiten erfolgt durch Einsatz von Filtern. Bei verbesserten Geräten wird zum Ausgleich der Strahler- und Detektorschwankungen sowie der Nullpunktsdefinition eine Referenzküvette mit nicht absorbierendem Gas alternierend eingesetzt. Die Detektion erfolgt für den IR-Bereich mit einem Gasdetektor und im VIS- und UV-Bereich mit einem Festkörperdetektor. Der Gasdetektor ist mit dem zu messenden Gas gefüllt. Die Strahlungsabsorption führt zu einer Temperaturerhöhung. Die bei festem Volumen resultierende Expansion wird über Ausgleichsströmung oder Druckanstieg gemessen.

b) Hygrometer-Prinzipien

Die im Temperaturbereich von etwa -80 bis $+20$ °C kondensierbaren Gaskomponenten wie Wasserdampf und Alkohol, können durch Messung des Taupunktes quantitativ bestimmt werden, ohne die übrigen vorhandenen Gaskomponenten zu beeinflussen. Der dem ermittelten Taupunkt proportionale Partialdruck p_i wird aus der zugehörigen Dampfdruckkurve ermittelt und der prozentuale Volumenanteil Vol% wird durch das Verhältnis zum Gesamtdruck p_{ges} bestimmt.

$$t_{\text{Taupunkt}} \propto p_i, \quad \text{Vol}\%_i = p_i / p_{\text{ges}}$$

Ein gängiges Verfahren hierzu ist die Detektion eines Flüssigkeitsniederschlages an einem temperierbaren Spiegel im Gasraum. Bei dieser Art Taupunktmesser wird periodisch der Spiegel so lange abgekühlt, bis durch kondensationsbedingte Reflexionsänderung an der Spiegeloberfläche der Taupunkt dieser Komponente erreicht ist [KOH85]. Bei gleichzeiti-

ger Anwesenheit von mehreren kondensierbaren Dämpfen kann jedoch nur die Komponente mit der höchsten Sättigungstemperatur gemessen werden.

Im Gegensatz zum Taupunktspiegel-Hygrometer, ist der Aluminiumoxid-Feuchtesensor ein wasserspezifisches Meßinstrument. Durch selektive Anlagerung und Ausnutzen der Dipolmomenteigenschaft wird direkt der Wasserdampfpartialdruck gemessen.

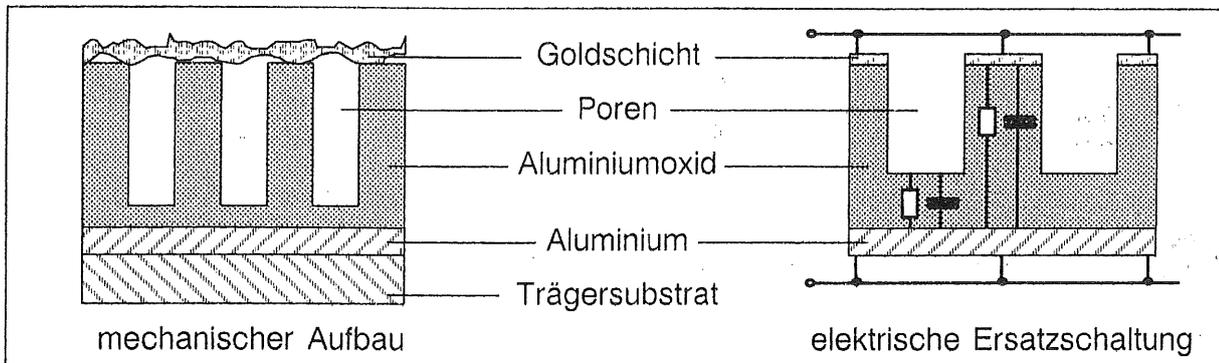


Abb. 8.3: Aufbau eines Sensors zur Feuchtemessung nach [PAN-M]

Dieser Feuchtesensor besteht aus einem Aluminiumträgerstreifen mit ca. 200 μm dicker poröser Aluminiumoxidschicht (Abb. 8.3). Diese wird nach oben durch eine dünne, gasdurchlässige Goldschicht mit einer Fläche von ca. 2 mm^2 abgeschlossen. Aluminium und Goldschicht stellen die Elektroden des kondensatorähnlichen Gebildes dar. Am stark hygroskopischen Aluminiumoxid lagert sich entsprechend dem Partialdruck bevorzugt Wasserdampf an. Infolge dieser spezifischen Absorptionseigenschaft und des ausgeprägten Dipolmomentes von 1,8 debye [RPS77], ändert das Wasser als einzige Gaskomponente Kapazität und Leitfähigkeit (50 $\text{k}\Omega$ bis 2 $\text{M}\Omega$ bei 77 Hz) dieser Schicht. Einzig bekannte Querempfindlichkeit besteht gegenüber Ammoniak [ULT93]. Die Impedanz dieses Systems ist so direkt dem Wasserdampfpartialdruck proportional und wird über eine AC-Meßbrücke ausgelesen. Aufgrund der produktionsbedingten Schichtdickenvariation wird jeder einzelne Sensor vom Hersteller kalibriert.

c) Verfahren zur Sauerstoffmessung :

Im Prozentbereich wird zur Bestimmung des Sauerstoffgehaltes das unter den Gasen einzigartige paramagnetische Verhalten des Sauerstoffs meßtechnisch umgesetzt (vergl. [OXYNO]). Im Subpromillebereich, der hier zur Anwendung kommt, werden wegen der höheren Sensitivität und Robustheit ausschließlich elektrochemische Zellen verwendet. Diese Analysatoren arbeiten nach einem einfachen coulometrischen Verfahren bei dem Sauerstoff aus dem Meßgas reduziert wird.

Bei Brennstoffzellen diffundiert ein Teil des Meßgases durch eine semipermeable Barriere in einen Elektrolyten und wird an der Kathode elektrochemisch reduziert (Abb. 8.4). Nach Wanderung durch den Elektrolyten werden die Hydroxidionen direkt am Anodenmaterial einer geschlossenen Zelle gebunden [EC90M] oder an einer offenen Anode zu freien Sauerstoffmolekülen oxidiert [PAN-F]. Der zu messende Strom zwischen Anode und Kathode ist dem Sauerstoffpartialdruck in der Probe direkt proportional. Der Nullpunkt ist eindeutig definiert, da bei Abwesenheit von Sauerstoff der Strom Null ist.

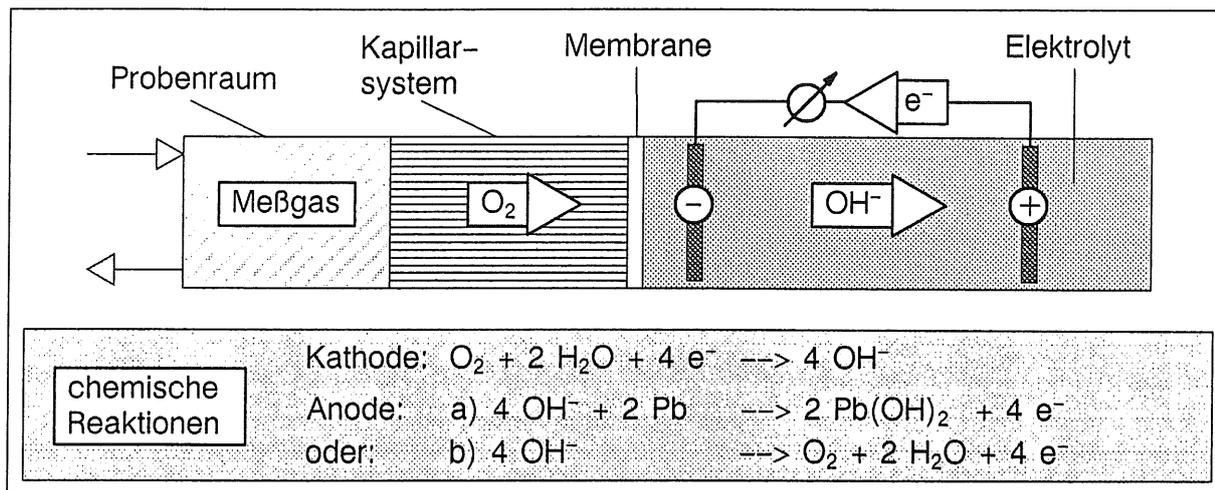


Abb. 8.4: Prinzip der Brennstoffzelle zur Sauerstoffbestimmung

Für unsere Anwendung ungeeignet sind Keramikoxid-Elektrolyt-Sensoren, die bei Temperaturen ab 600°C arbeiten. Brennbare Gase würden sich folglich entzünden und sich so mit dem nachzuweisenden Sauerstoff verbinden [BOB82]. Ebenso ungeeignet sind Zellen mit offener Kathode. Der flüssige Elektrolyt kontaminiert den Gasraum und die Messung ist stark flußabhängig [OXANA].

zu Gruppe 3:

a) MS – Massenspektrometer

Die Gaskomponenten werden zunächst im Vakuum ionisiert und beschleunigt. Die Trennung erfolgt beim Durchlaufen einer elektromagnetischen Ablenkeinheit, wo Ionen mit unterschiedlichem Verhältnis von Masse zu Ladung (m/e) eine andere Flugbahn beschreiben [ROB65].

Technisch wird das Meßgas durch ein Leckventil in den Hochvakuumbereich der Meßzelle expandiert. Die Elektronenstoßionisation ist das gebräuchlichste Verfahren, um die Atome und Moleküle teilweise in einfach und mehrfach geladene Ionen zu überführen. Das Auftreten und die relative Häufigkeit dieser Ionen ist stoffspezifisch. Die absolute Häufigkeit hängt von der spezifischen Ionisationswahrscheinlichkeit ab und ist dem Partialdruck der Komponente proportional. Eine gängige Trennmöglichkeit wird durch Quadrupolfelder realisiert (Abb. 8.5). Die beschleunigten Ionen werden mit dem Wechselanteil $U \cos \omega t$ zu Transversalschwingungen im Feld angeregt. Stabile, durchgehende Bahnen ergeben sich nur beim richtigen Verhältnis der Frequenz zu m/e . Die selektierten Ionen werden dann zum Beispiel mit einem Faraday-Auffänger registriert.

Das Ergebnis einer Messung ist ein Massenspektrogramm, eine lineare Superposition der Einzelspektren der verschiedenen Gaskomponenten (Abb. 8.6). In der digitalen Darstellung ist auf der Abszisse das m/e -Verhältnis und auf der Ordinate der dazu gehörende Partialdruck aufgetragen, wobei der Untergrund aus einer Referenzmessung schon abgezogen ist. Da normalerweise nicht jeweils ein m/e Kanal eindeutig nur von einer Gemischkomponente stammt, müssen zur Auswertung die charakteristischen Einzelspektren der Gase sukzessive subtrahiert werden. Im Beispiel ist der Peak zum m/e Verhältnis 28 aus Fraktionen aller drei Gassorten zusammengesetzt. Der in der Tabelle angegebene "Anteil" des Ions wird bezogen auf den Partialdruck der Masse der häufigsten Fraktion der

reinen Einzelsubstanz, die die Zahl 100 erhält. Die häufigste Fraktion von Luft ist das Anion $^{14}\text{N}_2^+$ ($m/e = 28$), die von Kohlendioxid $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2^+$ ($m/e = 44$) und die von Isobutan $^{12}\text{C}_3^{1}\text{H}_7^+$ ($m/e = 43$). Die drei unteren in der Tabelle angegebenen Anionen stammen eindeutig nur von einer der Gaskomponenten.

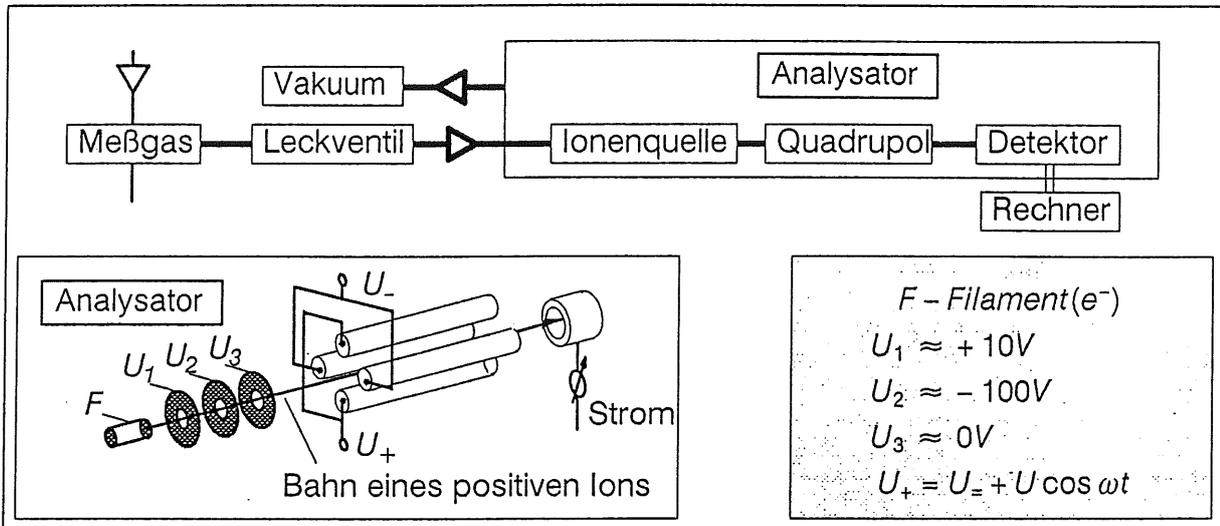


Abb. 8.5: Prinzip eines Massenspektrometers und Aufbau des Analysators

Gemäß den Erfahrungen im Hause [WIR89] kann eine absolute Konzentrationsbestimmung mit dem MS nicht mit hinreichender Genauigkeit durchgeführt werden. Hauptursache sind Vorgänge wie Effizienz der Ionisation und Detektion sowie systematische Effekte wie gemischabhängige Konzentrationsveränderungen durch Strömungseffekte am Leckventil.

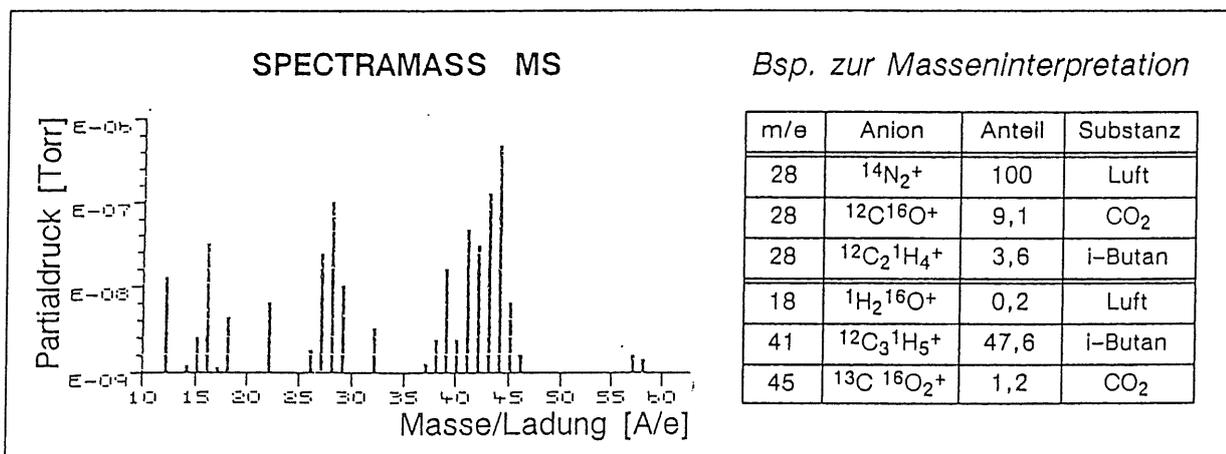


Abb. 8.6: Massenspektrogramm von CO_2 /Iso-Butan (80/20) und Luft, [DXM20]

b) FTIR – Fourier-Transformation Infrarot-Spektroskopie

Mit diesem Verfahren werden Stoffgemische analysiert, die Energien im IR-Bereich aufnehmen können (vergl. NDIR-Gerät). Ungefiltertes IR-Licht wird in ein Michelson Interferometer geleitet. Nach wellenlängenselektiver Absorption in einer Probengasküvette wird

das resultierende Interferogramm detektiert und mittels Fourier-Transformation in ein Absorptionsspektrum umgerechnet [SVA92].

Zur Erzeugung von Interferenzlicht ausreichender Intensität wird bei marktüblichen Geräten der bewegliche Spiegel mehrmals pro Messung über den gesamten zur Verfügung stehenden Wegbereich verfahren (Abb. 8.7).

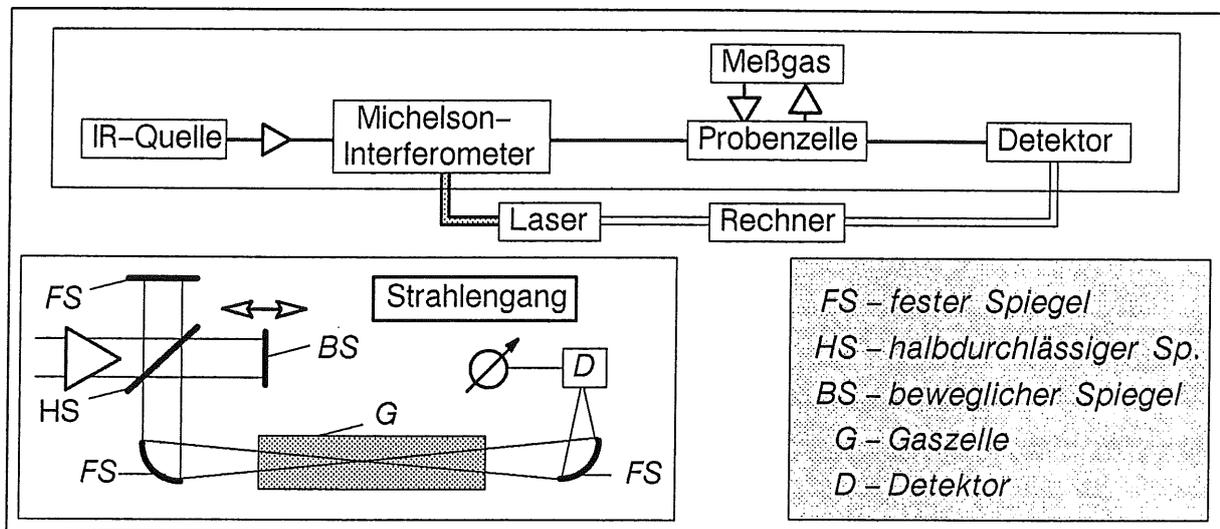


Abb. 8.7: Prinzip eines FTIR und Skizze des Strahlengangs

Die benötigte Präzision der Verschiebung erhält man durch Abstandsmessung der Ringinterferenzen eines He/Ne-Lasers und rechnergesteuertem Antrieb. Der typisch dezimeterlange Lichtweg in der Gaszelle kann durch Mehrfachspiegel auf einige zehn Meter verlängert werden. Als Detektor für den mittleren Infrarotbereich, kommt meist der Halbleiter DTGS (engl.: *deuterated glycin sulfat*) zum Einsatz.

Die Austrittsintensität I als Funktion des Verschiebeweges $\Delta/2$ eines eingestrahlinten Spektrums $B(\nu)$ läßt sich schreiben als:

$$I(\Delta) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} B(\nu) [1 + \cos(\frac{\Delta}{c} 2\pi\nu)] d\nu$$

Der vom Verschiebeweg abhängige Cosinusanteil wird als Interferogramm $J(\Delta)$ bezeichnet. Das Spektrum erhält man durch Fouriertransformation von $J(\Delta)$:

$$B(\nu) \propto \int_0^{\infty} J(\Delta) \cos(\frac{\Delta}{c} \pi\nu) d\Delta$$

Mit Hilfe eines mathematischen Tricks (Apodisation), können Effekte durch die endliche und diskontinuierliche Verschiebung weitgehend ausgeglichen werden. Als einfaches Beispiel ist in Abb. 8.8 das Absorptionsspektrum von Isopropanol (= 2-Propanol: $\text{CH}_3\text{-HCOH-CH}_3$) dargestellt. Zur Identifizierung der Substanz wird per Computer aus einer Software-Bibliothek das Spektrum mit größter Übereinstimmung ausgewählt; bei mehrkomponentigen Mischungen ist eine gewichtete Spektrenkombination zu ermitteln.

Eine quantitative Bestimmung mit der erforderlichen Genauigkeit, kann z.Zt. nur durch Vergleich mit Eichgasen erreicht werden.

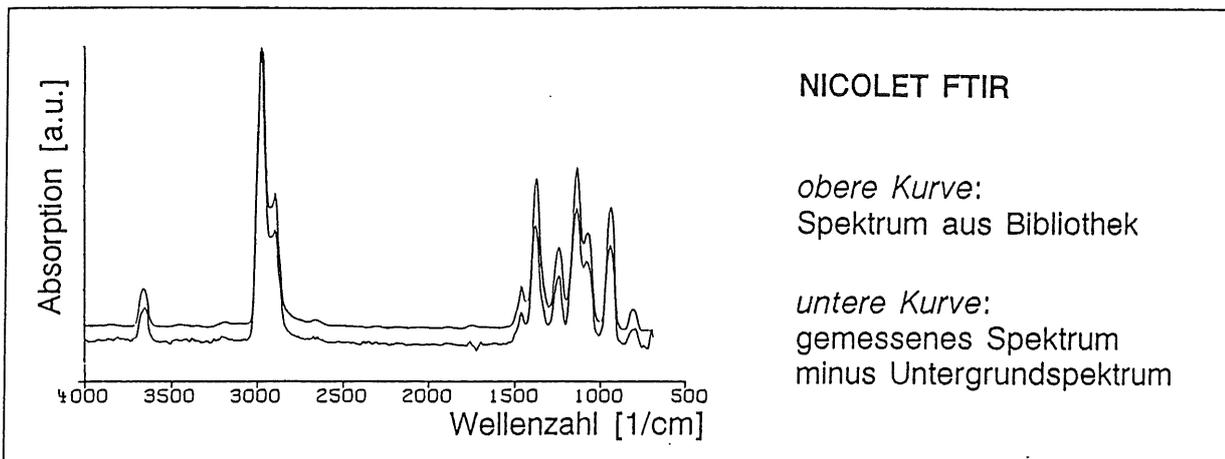


Abb. 8.8: Infrarot-Absorptionsspektrum von 2-Propanol aus [NIC89]

Einer der großen Vorteile dieser Anordnung gegenüber Gitterspektrometern ist, daß alle Spektrallinien gleichzeitig aufgenommen werden. Hinzu kommt eine vergleichsweise hohe Lichtausbeute, da keine engen Blenden notwendig sind. Die Leistungsfähigkeit des FTIR steigt mit verbesserter Rechenleistung der verwendeten Computer.

c) GC – Gaschromatographie

Die Gaschromatographie ist ein weiteres physikalisches Trennverfahren für Stoffgemische, die gasförmig vorliegen oder vollständig verdampft werden können. Die Trennung beruht auf einer selektiven, mehrmaligen Verteilung der Probenkomponenten zwischen einer unbewegten (stationären) und einer sich gerichtet bewegenden (mobilen) Phase [KEL61].

Technisch realisiert wird die stationäre Phase, indem die flüssige oder feste Trennschicht in ein dünnes Metall-, Kunststoff- oder Glasrohr (Trennsäule) eingefüllt wird. Die mobile Phase wird als Schlepp- oder Trägergas bezeichnet. Es muß sich gegenüber den Probenkomponenten und der stationären Phase inert verhalten und durchströmt kontinuierlich die Trennsäule (Abb. 8.9). Am Säulenbeginn erfolgt eine kurzzeitige Meßgaseinleitung ins Trägergas. Entsprechend den stoffspezifischen Verteilungskoeffizienten ist die Konzentration der unterschiedlichen Probenbestandteile in den Phasen verschieden. Somit wandern die einzelnen Komponenten mit unterschiedlicher Geschwindigkeit durch die Säule, so daß sie an deren Ende zeitlich getrennt austreten und von einem Detektor registriert werden. Ein übliches Konzentrations- und stoffabhängiges Meßprinzip ist die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeitsdifferenz zwischen reinem Trägergas und Trägergas mit Probenanteilen.

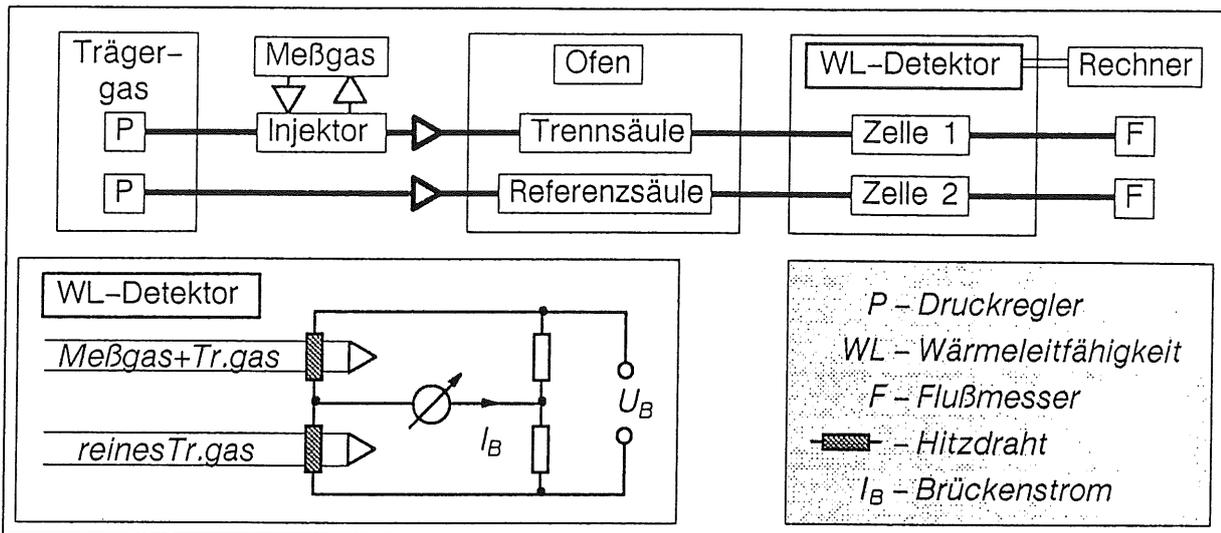


Abb. 8.9: Prinzip Gaschromatograph und Aufbau des Wärmeleitfähigkeitsdetektors

Als Ergebnis erhält man ein Chromatogramm (Abb. 8.10). Die Identität einer Komponente ergibt sich aus der Retentionszeit (RT), das ist die Zeit zwischen Probenaufgabe und Austritt aus der Säule. Die im Beispiel zu sehenden drei Peaks sind, in zeitlich aufsteigender Reihenfolge, den Gasen Luft, Kohlendioxid und Isobutan zuzuordnen (vergl. Abb. 8.6). Die Stoffmenge wird durch zeitliche Integration des Detektorsignals "Area" bestimmt. Die wahre Konzentration wird mit Hilfe von Konversionsfaktoren umgerechnet, die durch Vergleichsmessung mit einem Prüfgasgemisch bestimmt werden.

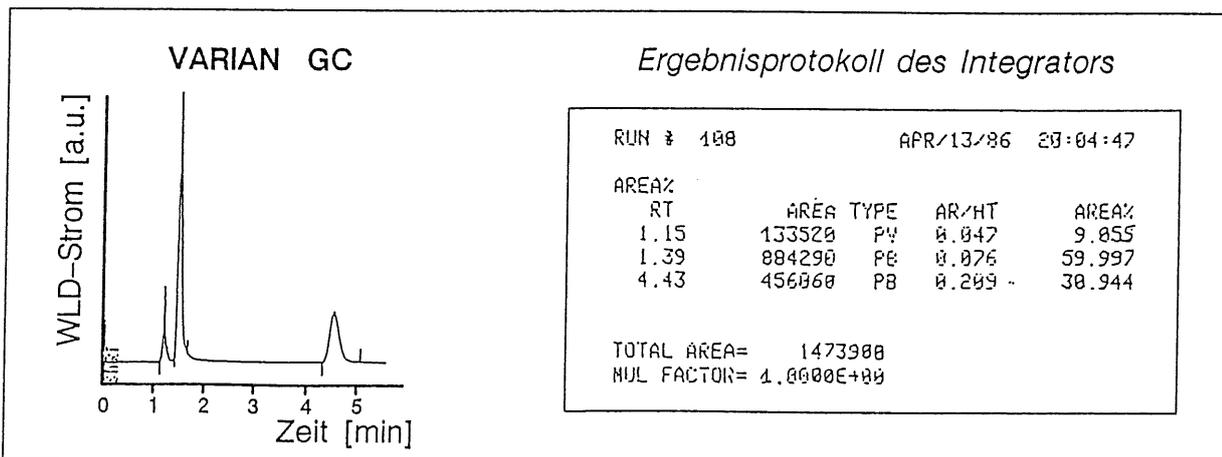


Abb. 8.10: Chromatogramm CO₂/i-C₄H₁₀ (80/20) plus Luft, [VAR37] und [HP339]

8.3 Bewertung und Auswahl der Geräte

Um die Meßaufgaben zu erfüllen, wäre eine kontinuierliche, automatische Gasanalyse an mehreren Stellen eines jeden Gaskreislaufes optimal. Da einerseits keines der vorausgewählten Geräte allein die Anforderungen erfüllen kann und andererseits der mehrfache Einsatz einer idealen Gerätekombination in allen Kreisläufen wirtschaftlich nicht zu vertreten ist, mußte ein anderes Konzept entwickelt werden. Unter zusätzlicher Berücksichtigung dieses Aspektes werden die in Kapitel 8.2 vorgestellten Meßverfahren abschließend bewertet und die Auswahl der Geräte zur Gasqualitätsüberwachung im H1-Experiment vorgestellt.

zu Gruppe 1:

Die im H1-Experiment verwendeten Kammergase sind meist aus drei verschiedenen Komponenten zusammengesetzt (vergl. Tab. 4.1). Um eindeutige Analysen zu erhalten, müßten folglich pro Meßstelle minimal zwei verschiedene physikalische Eigenschaften bestimmt werden. Der hohe apparative Aufwand und die relativ grobe Genauigkeit solcher Verfahren sprechen gegen diese Lösung. Jedoch wurden pro Kammer aus Sicherheitsgründen jeweils zwei empfindliche Differenzdruckmesser eingeplant (vergl. Kap. 6.3). Um aus deren Meßwerten die Dichte des Gasgemisches nach Abb. 8.1 grob zu bestimmen, wurden diese Sensoren in einem vertikalen Abstand von zwei Metern installiert.

zu Gruppe 2:

a) Aus der Gruppe der nicht dispersiven Fotometer sind speziell die IR-Geräte seit langem Standard in allen Gasversorgungsanlagen für Drahtkammern. Hiermit wird der Kohlenwasserstoffanteil der Meßgase überwacht. Auf Wunsch der Kammerbetreiber wurden in den H1-Gassystemen acht auf das jeweilige Kammergas und die Maximalkonzentration gezielte NDIR Geräte fest in den Kreisläufen installiert. Alle eingesetzten Geräte arbeiten nach dem Doppelstrahlprinzip mit einer Genauigkeit von zwei Prozent der Skala [INFRA]. Diese sind ein Sachbeitrag der ehemaligen "Akademie der Wissenschaften der DDR" aus Zeuthen. Zur vollständigen Erfassung aller Gaskomponenten müßten für die nicht infrarotaktiven Gase noch weitere UV- und VIS-Geräte installiert werden. Hierauf wurde verzichtet, da außer einer Kostenvervielfachung innerhalb der Meßgenauigkeit keine Aussagen über die in kleiner Konzentration vorliegenden Gasanteile wie Stickstoff, Sauerstoff und Wasser gemacht werden könnten.

b) Handelsübliche Taupunktspiegel-Hygrometer sind nicht für einen kontinuierlichen, automatischen Betrieb ausgelegt. Die Bedienung ist meist umständlich und es dauert etwa 5 Minuten, bis das Meßergebnis vorliegt. Zusätzlich sind Geräte dieses Typs sehr wartungsintensiv und passen daher nicht ins Konzept der H1-Anlagen.

Vom Meßprinzip her besser geeignet ist das Aluminiumoxid-Hygrometer, mit welchem schon gute Erfahrungen bei früheren Einsätzen (z.B. [KMA87]) gemacht wurden. Der verfügbare Meßbereich reicht von etwa 1 ppm bis 2.3% Wasserdampf bei Normaldruck mit einer Genauigkeit besser als 2%. Dies ermöglicht eine quantitativ zuverlässige Funktionskontrolle der Reiniger und der Wasserbeimischung, eine Aussage über die Reinheit der Oberflächen im Gassystem sowie Anhaltspunkte für Lufteinbrüche ins System. Der stationäre Einsatz dieser Geräte in den geschlossenen Gaskreisläufen ist zur kontinuierlichen Überwachung des Wasserdampfpartialdruckes unverzichtbar.

c) Wie oben beschrieben, kann zur Sauerstoffmessung nur der Typ Brennstoffzelle eingesetzt werden. Von den englischen Gruppen aus dem RAL und der Universität Liverpool wurde je ein Sauerstoffanalysator [EC90M] zur Verfügung gestellt. Der Vorteil dieses Gerätes ist die komplett geschlossene Bauweise, die eine Kontamination des Meßgases mit Elektrolyt ausschließt und eine weitgehend flußunabhängige Sauerstoffbestimmung garantiert. Verantwortlich hierfür ist ein Kapillarrohrsystem, welches den Gasraum von der Zelle trennt und als Effusionsmedium für den Sauerstoff dient. Bei einer Genauigkeit von 2% der Skala stehen vier Meßbereiche von 10 ppm bis 30% zur Verfügung. Neben einer Funktionskontrolle der Deoxos können Aussagen über die Reinheit und Dichtigkeit des kompletten Systems gewonnen werden. Da die meisten der verwendeten Gasmischungen brennbar sind, ist eine Sauerstoffmessung sicherheitsrelevant.

zu Gruppe 3:

Alle drei Geräte arbeiten nach völlig unterschiedlichen physikalischen Methoden (vergl. Kap. 8.2), um die gleiche Meßaufgabe zu erfüllen. Ziel ist die möglichst vollständige Analyse eines Gasgemisches, welche durch Identifikation und Konzentrationsbestimmung aller beteiligte Gase definiert ist. Um die Leistungsfähigkeit des Analysegerätes voll auszunutzen, ist es sinnvoll, über eine Probenumschaltstation alle Kreisläufe anzuschließen. Da die bei Driftkammern eingesetzten Gasgemische in der Industrie keine Anwendung haben, ließen sich auch keine dort gemachten Erfahrungen zur Wahl eines geeigneten Analysegerätes verwerten. Eigene Erfahrungen mit GC [VAR37] sowie MS [DXM20] waren daher von Vorteil. Welches der Geräte den Anforderungen bei H1 am nächsten kommt, soll durch eine Reihe von Kriterien ermittelt werden.

Bei Betrachtung der Nachweismöglichkeiten in Tab. 8.2 fällt auf, daß mit dem FTIR weder Edelgase (z.B. Argon, Xenon) noch homonukleare Molekülgase (Sauerstoff, Stickstoff) detektiert werden können. Dieser gravierende Mangel ist vom Prinzip her nicht behebbar, da diese Stoffe im IR-Bereich keine Absorptionsbanden besitzen.

Die Einschränkungen beim MS rühren daher, daß bei ähnlichen Stoffen die gleichen Ionen detektiert werden und die Anzahl der eindeutigen m/e Peaks einschränkt. Besonders schwierig ist die quantitative Sauerstoffbestimmung. Bei Anwesenheit sauerstoffhaltiger Moleküle wie Alkohol und Wasser sowie durch Ausgasungen der inneren Metalloberflächen im Hochvakuumteil des MS wird der Untergrund höher als der eigentliche Meßwert. Die Stärke des GCs liegt gerade in der guten Trennung von ähnlich aufgebauten Stoffen wie Ethan und Ethanol, da die unterschiedlichen funktionellen Gruppen und die Polarität starken Einfluß auf die Retention haben. Schwach polare Trennsäulen sind optimal zur Trennung der meisten vorkommenden Gaskomponenten geeignet. Wegen des hohen Dipolmomentes des Wassers wird jedoch dessen Peakform sehr breit und ist schlecht auszuwerten. Bei Anwesenheit von Argon oder Stickstoff im Prozentbereich gibt es zur Zeit keine Trennsäule, die Sauerstoff im ppm-Bereich davon trennen könnte. Diese drei Retentionszeiten sind sehr ähnlich und der Sauerstoffpeak geht somit vollständig im Stickstoff- bzw. Argonpeak unter. Um den Stickstoffanteil dennoch bestimmen zu können, ist eine weitere Analyse auf einer Molsiebsäule notwendig.

Gasart	Edelgase	C_xH_{2x+2}	$C_xH_{2x+1}OH$	H_2O	O_2	N_2
typ. Konzentration	1...90 Vol%	1...60 Vol%	0,3...2 Vol%	0...2000 ppm	0...2000 ppm	0...5 Vol%
MS	+	+	(+)	(+)	(+)	+
FTIR	-	+	(+)	(+)	-	-
GC	+	+	+	(+)	(+)	+
+: gut; (+): mit Einschränkung; - : nicht möglich						

Tab. 8.2: Vergleich der Nachweismöglichkeiten von MS, FTIR und GC

Die Meßgenauigkeit hängt von der Gaszusammensetzung ab und beträgt bei allen Geräten typ. 1–2% der Konzentration einer Komponente. Die Nachweiswahrscheinlichkeit liegt im Bereich von ca. 100 ppm. Die Analyseresultate sind jedoch in allen Fällen relative Konzentrationsangaben, da zur Kalibration Eichgasmischungen verwendet werden müssen. Um die Genauigkeit über die Zeit zu erhalten, muß beim FTIR täglich, beim MS monatlich und beim GC nach meiner Erfahrung überhaupt nicht neu kalibriert werden (vergl. Tab. 8.3).

Alle drei Geräte verhalten sich gegenüber dem Probegas inert. Beim GC und MS gelangen die zur Analyse verwendeten Gase nicht mehr in den Kreislauf zurück. Die elektromagnetische Bestrahlung beim FTIR hat keine chemische Veränderung der Gase beim Durchströmen der Meßzelle zur Folge und das Gas wird deshalb in den Kreislauf zurückgeführt.

	Nachweisqualitäten	Neu-Kalibration	Komplexität	Abhängigkeit von T+p	Preis / Leistung
MS	gut	monatlich	hoch	mittel	gut
FTIR	lückenhaft	täglich	hoch	groß	(gut)
GC	sehr gut	nie	niedrig	klein	sehr gut

Tab. 8.3: Vergleich von MS, FTIR und GC zur Auswahl des geeigneten Analysegerätes

Ein weiteres Kriterium ist die Komplexität der Meßanordnungen. Erfahrungsgemäß ist die Stabilität und Lebensdauer einer Anlage um so größer, je weniger Einzelkomponenten zur Funktion beitragen. Beim MS werden Leckventil, Vor- und Hochvakuumsystem, Ionenquelle, Quadrupol und ein ladungsempfindlicher Detektor benötigt. Beim FTIR ist das lasergesteuerte Michelson-Interferometer mit den Optiken mechanisch sehr aufwendig. Weiterhin werden eine IR-Quelle und ein entsprechender Detektor benötigt. Unsere langjährigen Erfahrungen mit Geräten dieser Art zeigen, daß der GC mit seinem robusten Detektor nahezu wartungsfrei die langzeitstabilste Alternative darstellt.

Die Intensität einzelner Linien und Banden im IR-Absorptionsspektrum hängt vom Druck p und besonders stark von der Temperatur T des Meßgases ab. Ohne zusätzlich Regelung dieser Parameter ist der Betrieb mit einem FTIR nicht sinnvoll. Beim MS ändert sich bei Variation von T und p sowohl die Menge der durch das Leckventil einströmenden

Gasmenge, als auch deren Konzentrationsverhältnis (Strömungseffekte). Nicht zuletzt hängt die Kaufentscheidung vom Preis/Leistungsverhältnis der Geräte ab. Die günstigste Alternative im Vergleich ist der GC. Zum selben Preis ist kein noch so einfaches MS erhältlich. Stärkstes Argument gegen den MS ist seine Komplexität. Wegen der stetig fallenden Preise für schnelle Rechner und Laser werden die FTIR-Geräte wirtschaftlich immer attraktiver. Ein solches Gerät könnte in zukünftigen Anlagen ein Ersatz für NDIR Geräte sein, ist aber wegen starker Einschränkungen der Nachweismöglichkeiten für den Einsatz im H1-Experiment nicht geeignet.

8.4 Realisierung und Resultate der Gasqualitätsüberwachung

a) Installation der Geräte zur Gasqualitätsüberwachung

Zur kompletten Analyse der unterschiedlichen Gasgemische in regelmäßigen zeitlichen Abständen steht ein GC [CP900] in Serie mit einem Sauerstoff-Spurenanalysator [EC90M] in Raum 601 zur Verfügung. Der Gasanschluß der Kammerkreisläufe erfolgt über eine Probenumschaltstation. Um die Rechenkapazität der Gassysteme zu entlasten, werden Steuerung, Auswertung, Dokumentation und Kommunikation von zwei "Personal Computern" (IBM 386 kompatibel) automatisch ausgeführt. Hygrometer, Infrarot-Fotometer sowie Differenzdruckmesser sind fest in den Kreisläufen der Gassysteme installiert (vergl. Anhang E). Die Meßwerterfassung und Protokollierung der Ergebnisse erfolgt durch das VME-System der jeweiligen Systeme (vergl. Kapitel 4.5).

Zur kontinuierlichen Messung des Kohlenwasserstoff- und Alkoholanteils sind in den beiden geschlossenen Kreisläufen des Gassystems I jeweils zwei NDIR-Geräte [INFRA] in Serie eingebaut. Vor und hinter den Reinigern sind Hygrometersensoren [PAN-M] in einem gasdichten Edelstahlgehäuse installiert (vergl. Kapitel 7.4). Gemeinsam mit dem Sensor zur Feuchtebestimmung des Spülgases für die Radiatoren werden die insgesamt fünf Sensoren von einem Steuergerät [PAN-5] betrieben.

Aufgrund der positiven Erfahrungen mit den Reinigern im Gassystem I (RAL), wird im Gassystem II nur das von der Kammer zurückgeführte Gas mit zwei Hygrometern überwacht [PAN3A]. Da hier im Normalfall ein Kreislauf als Reserve dient, sind die zusätzlich installierten NDIR-Geräte manuell umschaltbar.

Das Gassystem III enthält weder geschlossene Kreisläufe noch Reiniger und ist mit nur mit zwei NDIR-Geräten ausgestattet. Da die Kreisläufe mechanisch gleich aufgebaut sind und die Elektronik in allen Gassystemen identisch ist, sind im Bedarfsfall weitere Meßgeräte einfach nachzurüsten (siehe Anhang B).

In den Gaskreisläufen ist für Analysegeräte jeweils ein Zugang in der Leitung zu den Kammern ("to chambers") und in der Gasrückführung ("from chambers") vorgesehen. Um den Gasfluß durch die Analysegeräte unabhängig vom Fluß zu/von den Kammern einzuregeln, ist in den geschlossenen Kreisläufen ein separater Gasweg parallel zum Hauptfluß installiert. Die in Abb. 8.11 gezeigte Anordnung garantiert außerdem, daß der Druck am Ort der Meßgeräte in einem engen Bereich um den Luftdruck stabil ist. Die Druckreduktion vom Systemunterdruck auf den Versorgungsleitungsdruck geschieht am Nadelventil der Flußmesser *FLX-3* und *FLX-4*. Durch die Parallelführung haben die Strömungswiderstände, die durch den Analysengasweg verursacht werden, nur geringen Einfluß auf die Gasversorgung der Kammern. Die Rohrleitungen sind in Kupferrohr ($d_a = 6\text{mm}$) ausgeführt,

deren Länge über den Probenumschalter bis zu 20 m beträgt. Bei den offenen Kreisläufen ist die Verschaltung einfacher, da das zur Analyse benötigte Gas nicht mehr in die Versorgungsleitungen zurückgeführt werden muß. Mit nur einer Hinleitung, die vor dem die Kammer versorgenden Flußmesser angeschlossen ist, werden die Analysegeräte versorgt. An der Druckseite der Pumpe erzeugt ein mechanisches Federventil vor dem Auslaß ("Vent") den nötigen Vordruck (Δp - 80 mbar), um das Gas von der Kammer zur Analyse zu befördern.

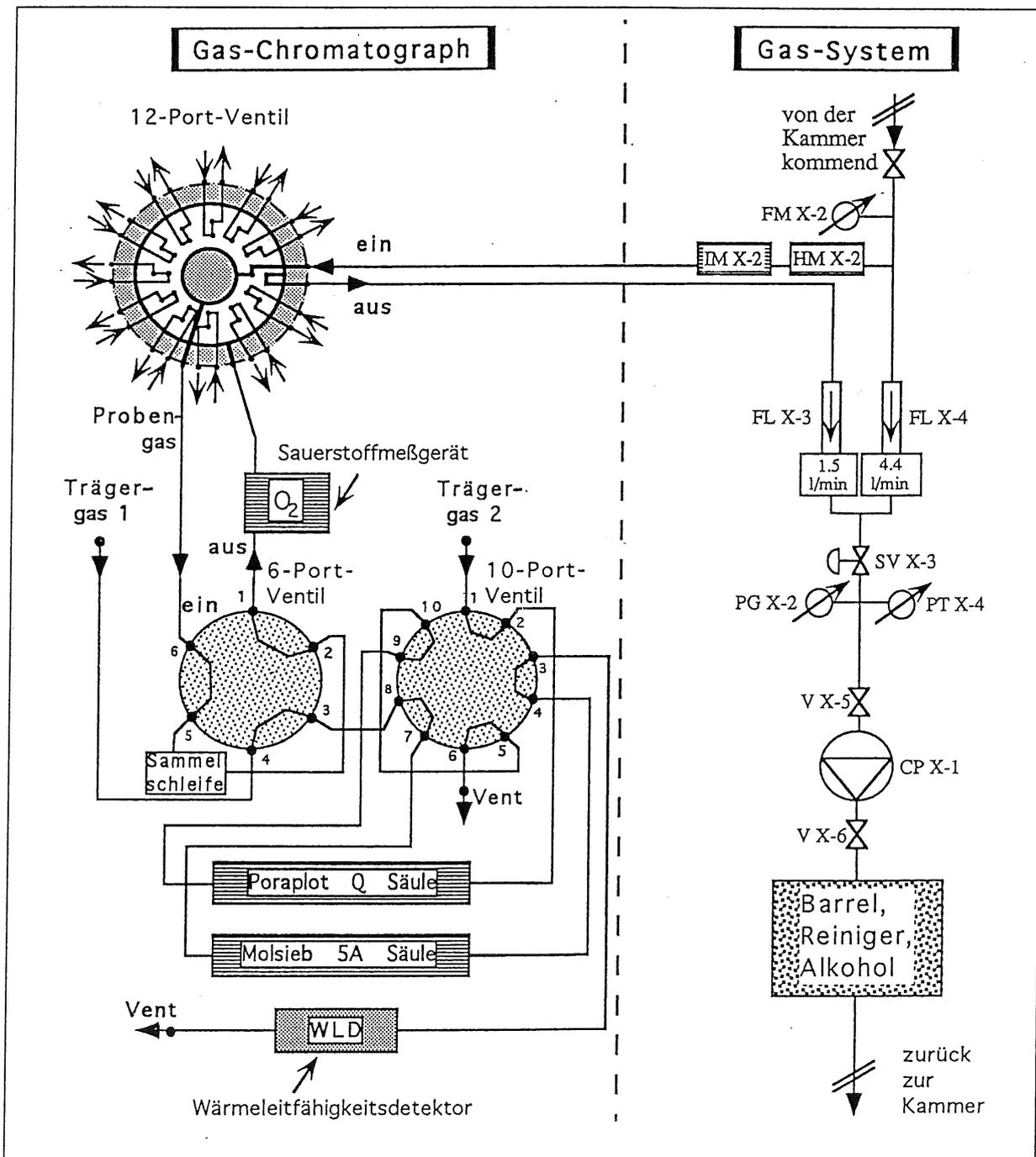


Abb. 8.11: Anschluß der Analysegeräte in geschlossenen Kreisläufen und Verschaltung von Probenumschaltstation und Gaschromatograph aus [DRE91]

Die Aufgabe der Probenumschaltstation ist die Steuerung der Gasflüsse, um definiert Proben aus den Kreisläufen für den Gaschromatographen bereitzustellen. Zwischen den einzelnen Analysen verschiedener Proben ist der gemeinsam benutzte Gasweg zu spülen. Die hierzu notwendige Verschaltung wäre mit einer hohen Anzahl einfacher Ventile sehr aufwendig und wird deshalb mit nur zwei Multipositionsventilen mit Schrittmotorsteuerung realisiert. Diese Ventile [VIC11] sind zweiteilig aufgebaut (siehe Anhang D, Abb. 8.11). Am feststehenden Außenzylinder sind Rohrverschraubungen angebracht, die in radialen Bohrungen nach innen münden. Auf dem innenliegenden Rotor sind Nuten zur Verbindung der Gaswege eingefräst. Zum Anschluß der offenen Kreisläufe dient das Einbahn-Multipositions-Ventil (EMV). Der vom Rotoranschluß selektierte Kanal ermöglicht einen Gasfluß zum Fluß-Multipositions-Ventil (FMV), während alle anderen Wege gesperrt sind. Von den insgesamt 16 Anschlüssen dient einer zur Spülgasversorgung und ein weiterer als 'Ruheposition'. Wenn am FMV die Position "1" gewählt ist, wird das Gas vom EMV in einer geschlossenen Schleife über den GC, bei allen anderen Positionen direkt in den Gasauslaß geführt. Alle übrigen Kanäle des FMV dienen dem Anschluß der geschlossenen Kreisläufe, die notwendigerweise in nicht selektierter Position kurzgeschlossen sind. Die gesamte Verrohrung innerhalb der Probenumschaltstation ist in Kupferrohr ($d_a = 1/8''$) ausgeführt.

Im Gehäuse des GC sind zwei weitere Multipositionsventile mit pneumatischem Antrieb eingebaut. In der gezeichneten Stellung des "6-Port"-Ventils wird die Sammelschleife mit Probengas und die Analysensäule mit Trägergas 1 (Helium) gespült (Abb. 8.11). In der um 60° gedrehten Ventilstellung wird der Probenfluß kurzgeschlossen und mit Helium die Gasmenge aus der Sammelschleife der Analyse zugeführt. Das "10-Port"-Ventil ist nachgeschaltet, um eine Analyse auf zwei unterschiedlichen Analysensäulen zu ermöglichen. In der gezeigten Stellung wird das vom 6-Port-Ventil kommende Gas (hier: Trägergas 1) durch die Molsiebsäule zum Wärmeleitfähigkeitsdetektor gelenkt, während die Poraplotsäule rückwärts mit Trägergas 2 (Helium) zum Austreiben von stark adsorbierten Gasen gespült wird. Nach erneuter Probensammlung im 6-Port-Ventil wird durch Drehung des 10-Port-Rotors die Probe auf die Poraplotsäule geschaltet. Entwicklung und Aufbau der automatischen GC-Station mit Probenumschalter wurde im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführt und ist dort genauer beschrieben [DRE91].

b) Resultate der Gasqualitätsüberwachung

Die Leistungsfähigkeit der in den H1-Gassystemen installierten Geräte zur Gasqualitätsüberwachung wird am Beispiel des Kreislaufes 1 von Gassystem I gezeigt. Dieser Kreislauf versorgt die drei Planaren Driftkammern, die gemeinsam mit den F-MWPCs im selben Gasvolumen untergebracht sind.

In einem festen, automatisch gesteuerten Zyklus wird mit dem Gaschromatographen zweimal täglich das aus der Kammer zurückfließende Gas analysiert. Im ersten Schritt wird das Gasgemisch in der Poraplotsäule getrennt. Als Resultat sind im Chromatogramm Propan und Ethanol eindeutig anhand ihrer Retentionszeiten zu identifizieren. Der erste Peak im Chromatogramm enthält hauptsächlich die nicht getrennten Gase Argon, Stickstoff und Sauerstoff. Die Sauerstoffkonzentration wird mit dem nachgeschalteten Spurenanalytator gemessen, während Stickstoff und Argon in einem weiteren Analysenschritt in der Molsiebsäule getrennt werden. Die Peakflächen aus beiden Chromatogrammen werden

mit Hilfe von Responsefaktoren zur quantitativen Bestimmung der Konzentration der identifizierten Komponenten ausgewertet. Die typische Genauigkeit liegt in der Größenordnung von 1% der Konzentration einer Komponente [DRE91]. Die in der Runperiode 1993 aufgezeichneten Resultate [DDR92] sind in Abb. 8.12 dargestellt. Der hohe Stickstoffanteil stammt aus Lecks im stickstoffgespülten Bereich direkt an den Kammern. Wegen der hohen Gasdichtigkeit der Versorgungsanlagen wurde der gemessene Sauerstoffanteil in dieser Runperiode nicht automatisch aufgezeichnet. Bei gelegentlichen Stichproben wurden stets Werte kleiner 40 ppm gemessen. Die Resultate der Hygrometersensoren vor und hinter den Reinigern ergänzen die Analysen des GC's (s. Kapitel 7.4). In besonderen Fällen, z.B. um nach Verunreinigungen im Spurenbereich zu suchen, kann die Analysestation auf manuellen Betrieb umgeschaltet werden.

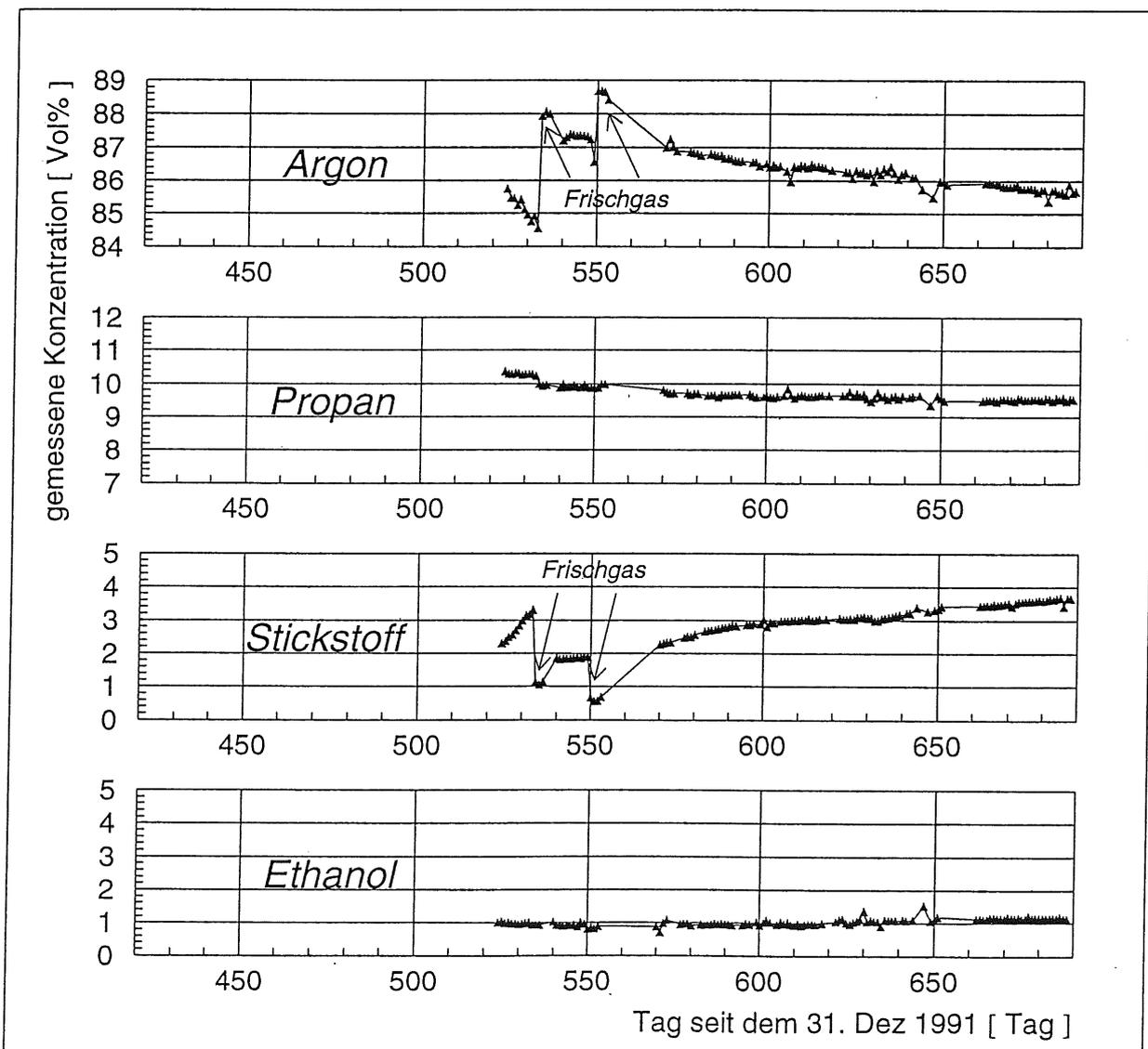


Abb. 8.12: GC-Analysen des Gases aus den Planaren/F-MWPCs

Die beiden kontinuierlich arbeitenden NDIR-Geräte zur Messung von Propan und Ethanol sollten zu den Resultaten des GC's redundante Ergebnisse liefern. Leider zeigte sich kurz nach der Installation dieser Geräte, daß die IR-Filterung nicht ausreicht und deshalb beide

Geräte in gleichem Maß auf Propan und Ethanol reagieren. Da es herstellereitig nicht möglich war, diese Querempfindlichkeiten abzustellen, verblieb nur ein Gerät im Kreislauf, welches die Summe der Propan- und Ethanolkonzentration anzeigt. In den Meßergebnissen dieses Gerätes (Abb. 8.13, oben) ist der Propananstieg beim Füllen des Systems nach der manometrischen Methode deutlich zu erkennen. Wegen der Zuverlässigkeit der GC-Resultate wurde auf eine tägliche Kalibrierung des Gerätes verzichtet. Deshalb ist in den aufgezeichneten Meßdaten eine stetige Drift der Meßwerte festzustellen. Zur Gasdichtebestimmung ist die Differenz der Drucksensoren, die den Kammerinnendruck messen, in Abb. 8.13 (unten) aufgetragen. Der Mittelwert beträgt 9,3 Pa (Bandbreite ± 1 Pa) und ist mit der nach Kapitel 6.3 bei 24°C berechneten hydrostatischen Druckdifferenz für dieses Gemisch identisch.

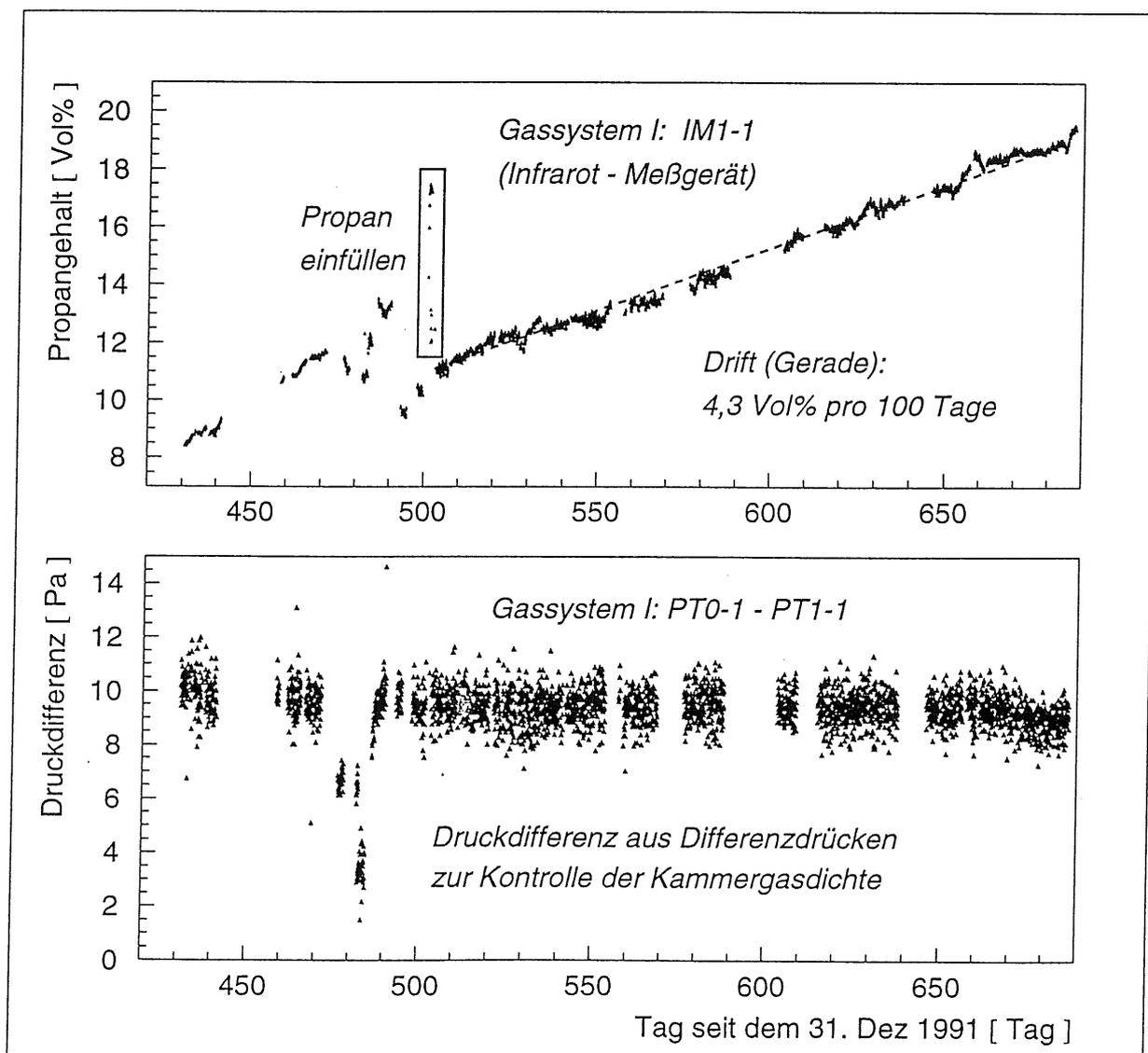


Abb. 8.13: gemessener Propangehalt (NDIR-Gerät, oben) und Druckdifferenz von Kammer- und Kreislaufdruckmesser (unten) des Gases aus den Planaren/F-MWPCs

9. Zusammenfassung

Die physikalischen Prozesse am HERA-Beschleuniger weisen ein kinematisches Ungleichgewicht auf. Das bedingt einen asymmetrischen Aufbau der Detektoren H1 und ZEUS. Der innerste Teil des H1-Detektors besteht aus einem komplexen Spurkammersystem. Die verschiedenen Kammertypen sind jeweils für andere Aspekte der Spurvermessung optimiert. Zur Gewährleistung der Funktion ist im laufenden Betrieb eine individuelle Gasmischung erforderlich. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Entwicklung, Bau und Betrieb universeller Gasversorgungsanlagen für diesen Detektorteil.

Wegen der konsequenten Leichtbauweise sind die Kammern gegen mechanische Belastungen sehr empfindlich. Eine Schwierigkeit bei der Gasversorgung besteht folglich darin, daß der Kammerinnendruck innerhalb von wenigen Pa um den Luftdruck geregelt werden muß. Die Regelung muß Temperaturschwankungen und Druckänderungen in der Luft sowie in den benachbarten Kammern ausgleichen. Zusätzlich verlangt ein stabiler Betrieb der Spurkammern einen dem Kammervolumen proportionalen Gasfluß. Mit einer rechnergesteuerten Regelung, die auf Druckveränderungen von weniger als 0,1 Pa sensitiv ist, werden beide Anforderungen erfüllt. Zusätzlich sind zum Schutz der Kammern und zur Vermeidung von Gefahren unabhängige mechanische und elektronische Alarmsysteme installiert.

Eine sehr wichtige Anforderung an die verwendeten Kammergase ist ihre Zusammensetzung, die sowohl über lange Zeiträume stabil als auch nach Unterbrechungen reproduzierbar sein muß. Die Langzeitstabilität der Zusammensetzung wird durch geschlossene Kreisläufe mit Gasreinigern realisiert. Mit Hilfe der Reinigereinheiten werden kontinuierlich unerwünschte Verunreinigungen aus dem Kammergas entfernt, die durch unvermeidliche Lecks ins System eindringen und sich sonst dort akkumulieren würden. Ein weiterer wichtiger Grund für dieses Konzept ist die Senkung der Ausgaben für Gase. Insbesondere ist die Verwendung von xenonhaltigen Gemischen nur so finanzierbar.

Da bei einem Betrieb der Kammern über einen Zeitraum von einer Dekade mit Alterungseffekten gerechnet werden muß, soll dem durch die Zufügung von Wasser oder Alkohol vorgebeugt werden. Hierzu wurden Anlagen zur kontinuierlichen Beimischung nach der Sättigungsmethode gebaut, die innerhalb der erforderlichen Genauigkeit arbeiten.

Die Additive verursachen besondere Probleme in geschlossenen Kreisläufen, da sie normalerweise mit den Reinigermaterialien chemisch reagieren. Nach umfangreichen Voruntersuchungen mit speziellen Reinigern wurden Verfahren entwickelt, die erstmals eine Reinigung von Kammergasen mit Wasser- oder Alkoholdampfungsmitteln in geschlossenen

Kreisläufen ermöglichen. Der Einfluß von Reinigung und Zumischung auf das Kammergas erfordert eine permanente Überwachung der Gasqualität.

Erfahrungsgemäß können bei der Herstellung von Gasgemischen erhebliche Abweichungen von der gewünschten Zusammensetzung auftreten. Deshalb müssen sowohl die innerhalb der Gaskreisläufe als auch die extern hergestellten Gemische sorgfältig überprüft werden. Wegen der hohen Anzahl von verschiedenen und im Laufe der Zeit wechselnden Gemischen ist hierzu ein möglichst universelles und flexibles Analysegerät sinnvoll. Da sich der Gaschromatograph im Vergleich mit anderen Geräten als beste Alternative erwiesen hat, wurde für alle gasgefüllten Kammern des H1-Detektors eine vollautomatische GC-Station entwickelt und eingesetzt, deren Analysen durch Resultate von Hygrometern und einem Sauerstoff-Spurenanalysator sinnvoll ergänzt werden.

Mit der Entwicklung und dem Aufbau der etwa 1.000.000,- DM teuren Anlagen wurde Ende 1988 in Aachen begonnen. Parallel dazu erfolgte in zehn internationalen Instituten der Bau der Kammern. Um die in den jeweiligen Testphasen neu auftretenden Anforderungen an die Gassysteme zu erfüllen, sind in der Folgezeit diverse Weiterentwicklungen und Zusatzanlagen implementiert worden. Die hier vorgestellte Realisierung von geschlossenen Kreisläufen mit Reinigern für alkoholhaltige Kammergase ist ebenso erstmalig wie die kontinuierliche, vollautomatische Analyse der Gaszusammensetzung. Seit Anfang 1991 sind die drei nahezu identischen Gassysteme zur Versorgung der 16 Spurenkammern mit dem H1-Detektor verbunden und arbeiten seitdem sicher und störungsfrei.

Anhang A: Erklärung der logischen Namen

Die in den Gassystemen verwendeten Geräte und Anlagenteile werden durch "logische Namen" eindeutig gekennzeichnet. Diese Bezeichnungsart ist in allen Gassystemen identisch und ermöglicht eine klare Zuordnung der Komponenten in Mechanik, Elektronik und Programm. Die Struktur der logischen Namen ist wie folgt in Buchstaben *A,B,C,D* und Zahlen *X,Y* gegliedert:

ABX-Y(CD) z.B.: PT1-1N

Diese Symbole bedeuten im einzelnen:

- AB : Mit einem oder zwei ersten Buchstaben wird der Geräte-/Teiletyp abgekürzt. Diese sind die Anfangsbuchstaben der englischen Bezeichnung, deren Bedeutung in Tab. A1 erklärt ist. Im Beispiel steht *PT* für "Pressure Transducer", das ist ein elektronischer Druckwandler.
- X : Die erste Zahl gibt normalerweise die Nummer des Kreislaufes im Gassystem an (hier: *1* = Kreislauf Nr.1). Eine Ausnahme von dieser Regel bilden die logischen Namen für die Niederspannungen. Hier werden das Vorzeichen und die Spannungsangabe selbst direkt an die ersten beiden Buchstaben angehängt. Alle verwendeten Zahlen und Zeichen sind in Tab. A2 aufgelistet.
- Y : Die zweite Zahl gibt die interne Numerierung innerhalb desselben Kreislaufes an, um Geräte/Bauteile desselben Typs eindeutig identifizieren zu können; hier bedeutet die laufende Nummer *1* : Druckwandler für die Sollwertfassung der Kammerdruckregelung (siehe auch Anhang B).
- (CD) : Nachfolgende ein oder zwei Buchstaben bezeichnen die zu einem Gerät zugeordneten "Parameter". Diese Zusätze werden nur in der Programmsteuerung benötigt (Tab. A3). Im obigen Beispiel steht *N* für "Nominal", das ist der Sollwert der Meßgröße *PT1-1*.

Wie in internationalen Experimenten üblich, sind Schaltpläne, Verrohrungspläne und Bedienerprogramme in Englisch. Zur Erklärung des Ursprungs der verwendeten Abkürzungen enthalten die nachfolgenden Tabellen jeweils eine Spalte in englischer Sprache.

"AB"	device	Gerät
CP	<u>C</u> ircuit <u>P</u> ump	Kreislaufpumpe
FL ¹⁾	<u>F</u> low meter incl. needle valve	mechan. FLußmesser mit Nadelventil
FC	Mass <u>F</u> low <u>C</u> ontroller (FM+FR values)	Massenflußregler (FM + FR Werte)
FM	<u>F</u> low meter <u>M</u> easured value	(Massen-) Flußmesser (Meßwert)
FR	<u>F</u> low meter <u>R</u> egulation set point	Massenflußmesser (Sollwert; analoger Ausgang)
HE	<u>H</u> Eating (Purifier/Fridge)	Heizung (Reiniger/Additiv)
HM	<u>H</u> ygro <u>M</u> eter	Hygrometer
IM	<u>I</u> nfrared <u>M</u> onitor	Infrarot Meßgerät
LC	<u>L</u> imit <u>C</u> ard	Grenzwerte-Platine
LD	<u>L</u> ow voltage <u>D</u> dr pressure transducer	Niederspannung für sogen. DDR-Druckwandler
LM	<u>L</u> ow voltage <u>M</u> KS pressure transducer	" MKS-Druckwandler
LS	<u>L</u> ow voltage <u>S</u> olenoid valve	" Magnetventil
LT	<u>L</u> ow voltage <u>T</u> railer	" Trailer
LV	<u>L</u> ow voltage <u>V</u> ME crate	" VME-Einschub
MV ¹⁾	<u>M</u> echanical spring safety <u>V</u> alve	mechan. Federventil; Überdruckventil
PG ¹⁾	<u>P</u> ressure <u>G</u> auge	mechan. Manometer
PT	<u>P</u> ressure <u>T</u> ransducer	elektrischer Druckwandler
SV	<u>S</u> olenoid <u>V</u> alve	Magnetventil
TS	<u>T</u> emperature <u>S</u> ensor	Temperatur Sensor
V ¹⁾	2- or 3-ways manual <u>V</u> alve	2- oder 3-Wege-Kugelhahn-Ventil
WD	<u>W</u> atch <u>D</u> og	Überwachungsschaltkreis
¹⁾ not within computer control = nicht unter Programmsteuerung		

Tab. A1: Erklärung der ersten Buchstaben AB in den "logischen Namen"

"X"	meaning	Erklärung
0	not included in the following no.s	nicht in den folgenden Nr. enthalten
1	gas circuit 1	(Gas-) Kreislauf 1
2	gas circuit 2	Kreislauf 2
3	gas circuit 3	Kreislauf 3
4	gas circuit 4	Kreislauf 4
5	gas circuit 5	Kreislauf 5
6	gas room level 6 (room no. 601)	Gasraum im 6. Stock (Raum 601)
7	location at level 7 (ground floor)	Gasgebäude ebenerdig (7. Stock)
8	top of the electronic trailer	Auf dem Elektronikwagen; (Exp.halle)
9	purifiers	Reiniger
+12	sign and dc voltage; same notation for: +5, -12, +15, -15, +24	Gleichspannung und Vorz.; in gleicher Weise: +5, -12, +15, -15, +24

Tab. A2: Bedeutung der ersten Zahl X in den logischen Namen

"CD"	name of parameter	nähere Bezeichnung des Parameters
--	<u>A</u> nalog	Meßwert = analoger Eingangswert
N	<u>N</u> ominal	Sollwert
R	<u>R</u> egulation	Regelwert (symmetrisch, relativ zu 'N', s.u.)
W	<u>W</u> arning	Wert für Warnung (" " " ")
A	<u>A</u> larm	Alarmwert (" " " ")
SA	<u>S</u> uper <u>A</u> larm	Superalarmgrenze (fest)
NR	<u>N</u> ominal \pm <u>R</u> egulation	Sollwert \pm Regelwert = Regelgrenze
NW	<u>N</u> ominal \pm <u>W</u> arning	Sollwert \pm Warnungswert = Warnungsgrenze
NA	<u>N</u> ominal \pm <u>A</u> larm	Sollwert \pm Alarmwert = Alarmgrenze

Tab. A3: Anhang CD zur Charakterisierung der Parameter eines Meßwertes im Programm

Anhang B: Ein-/Ausgabemodule (aus [MAG02])

Digital I/O Cards 1 + 2 (VDR1 + 2)							All devices are located in the VME crate at room 601	
No.	Card / Pin	OUTPUT	OUTPUT IN USE			INPUT	Comments (for OUTPUT)	
		Logical Name	GAS1	GAS2	GAS3	Logical Name		
0	01 / 00	CP 1-1	*	*	*	LC 0-1	Circuit.Pump	gas circulator Cir.1
1	01 / 01	SV 1-1	*	*	*	Not conn.	Solenoid Valve	Inlet "
2	01 / 02	SV 1-2	*	*	*	"	"	to chambers "
3	01 / 03	SV 1-3	*	*	*	"	"	from chambers "
4	01 / 04	SV 1-4	*	*	--	"	"	internal bypass "
5	01 / 05	SV 1-5	*	*	--	"	"	ventilation "
6	01 / 06	HE 9-1	*	*	<*>	"	HEating off/on/auto <fridge 4>	deoxo 1 "
7	01 / 07	HE 9-2	*	*	<*>	"	HEating off/on/auto <fridge 5>	molsieve 1 "
8	01 / 08	CP 2-1	*	*	*	"	Circuit Pump	gas circulator Cir.2
9	01 / 09	SV 2-1	*	*	*	"	Solenoid Valve	inlet "
10	01 / 10	SV 2-2	*	*	*	"	"	to chambers "
11	01 / 11	SV 2-3	*	*	*	"	"	from chambers "
12	01 / 12	SV 2-4	*	*	--	"	"	internal bypass "
13	01 / 13	SV 2-5	*	*	--	"	"	ventilation "
14	01 / 14	HE 9-3	*	--	<*>	"	HEating off/on/auto <fridge 6>	deoxo S Cir.1or2
15	01 / 15	HE 9-4	*	--	--	WD 0-1	HEating off/on/auto	molsieve S (Standby) "
16	02 / 00	CP 3-1	*	--	*	LC 0-2	Circuit Pump	gas circulator Cir.3
17	02 / 01	SV 3-1	*	--	*	Not conn.	Solenoid Valve	inlet "
18	02 / 02	SV 3-2	*	--	*	"	"	to chambers "
19	02 / 03	SV 3-3	*	--	*	"	"	from chambers "
20	02 / 04	HE 9-5	*	*	--	"	HEating off/on/auto	deoxo 2 Cir.2
21	02 / 05	HE 9-6	*	*	--	"	HEating off/on/auto	molsieve 2 "
22	02 / 06	HE 1-6	*	<*>	--	"	HEating off/on/auto	fridge 1 <fridge 3> Cir.1
23	02 / 07	HE 2-6	*	*	--	"	HEating off/on/auto	fridge 2 Cir.2
24	02 / 08	CP 4-1	*	--	*	"	Circuit Pump	gas circulator Cir.4
25	02 / 09	SV 4-1	*	--	*	"	Solenoid Valve	inlet "
26	02 / 10	SV 4-2	*	--	*	"	"	to chambers "
27	02 / 11	SV 4-3	*	--	*	"	"	from chambers "
28	02 / 12	CP 5-1	--	--	*	"	Circuit Pump	gas circulator Cir.5
29	02 / 13	SV 5-1	--	--	*	"	Solenoid Valve	inlet "
30	02 / 14	SV 5-2	--	--	*	"	"	to chambers "
31	02 / 15	SV 5-3	--	--	*	WD 0-2	"	from chambers "

Abbreviations :
 * installed
 (*) inst. but different range
 -- not installed
 <*> different meaning

LC 0-X provides ENRET (=enable return) for the crate master to continue operation
 In case of any LC- or WD- alarm the system will be stopped (hardware super alarm) !!

first edtlon	30.01.89	S. Masson	H1 GAS ALL; DIO cards
last revislon:	12.04.94	S. Masson	III. Physikalisches Institut B RWTH Aachen

Tab. B1: Die Kanäle der zwei digitalen Ein-/Ausgabemodule aus dem VME-Einschub

Analog Input Card 1-1 (AFB 1 + LID 1)

(card - plug)

No.	Ch. No.	Loc.	Logical Name	INPUT IN USE			Range		LCC	Comments
				GAS1	GAS2	GAS3	output	physical		
0	0	Tr.	PT 1-1	*	(*)	*	-1...+1 V	+/- 1 mbar _{rel}	Y	Main Pressure Transd. at top of the rig Cir.1
1	1	"	PT 2-1	*	(*)	*	"	(+/-10mbar _{rel})	Y	" Cir.2
2	2	"	PT 3-1	*	—	*	"	"	Y	" Cir.3
3	3	"	PT 4-1	*	—	*	"	"	Y	" Cir.4
4	4	"	PT 5-1	—	—	*	"	"	Y	" Cir.5
5	5	"	PT 0-1	*	(*)	*	"	"	Y	press. Chamber 1 at bottom of the rig
6	6	"	PT 0-2	*	(*)	*	"	"	Y	" Chamber 2
7	7	"	PT 0-3	*	—	*	"	"	Y	" Chamber 3
8	8	"	PT 0-4	*	—	*	"	"	Y	" Chamber 4
9	9	"	PT 0-5	*	—	*	"	"	Y	" Chamber 5
10	10	"	PT 0-6	*	—	—	"	"	Y	" Chamber 6
11	11	"	PT 0-7	*	—	—	"	"	Y	" Chamber 7
12	12	L 6	FM 1-1	*	*	—	4...20 mA	+/-400mbar _{rel}	N	Flow-Meter to chambers Cir.1
13	13	"	FM 1-2	*	*	(*)	(0...5 V)	(100 NI gas)	N	from chambers ("c" Ar/C2H6 50/50) Cir.1
14	14	"	FM 2-1	*	*	—	"	"	N	Flow-Meter to chambers Cir.2
15	15	"	FM 2-2	*	*	(*)	"	"	N	from chambers ("d" Ar/C2H6 50/50) Cir.2
16	16	"	FM 3-1	*	—	—	"	"	N	Flow-Meter to chambers Cir.3
17	17	"	FM 3-2	*	—	(*)	"	"	N	from chambers ("e" Ar/C2H6 50/50) Cir.3
18	18	"	FM 4-1	*	—	—	"	"	N	Flow-Meter to chambers Cir.4
19	19	"	FM 4-2	*	—	(*)	"	"	N	from chambers ("a" Ar/CH4 80/20) Cir.4
20	20	"	FM 5-1	—	—	—	"	"	N	Flow-Meter to chambers Cir.5
21	21	"	FM 5-2	—	—	(*)	"	"	N	from chambers ("b" Ar/C3H8 70/30) Cir.5
22	22	"	AUX 01	*	*	*	0...20 mA		N	Auxiliary
23	23	"	AUX 02	*	*	*	0...10 V		N	Auxiliary
24	24	"	PT 1-3	*	*	(*)	4...20 mA	2,5 _{abs} (1 _{rel})bar	N	barrel (inlet) system press. Cir.1
25	25	"	PT 1-4	*	*	*	"	- 1 bar _{rel}	N	pumps negative press. potential Cir.1
26	26	"	PT 1-5	*	*	—	"	+ 1 bar _{rel}	N	between Membranes of Circuit Pump Cir.1
27	27	"	PT 1-6	*	*	—	"	+ 1 bar _{rel}	N	inside fridge Cir.1
28	28	"	PT 2-3	*	*	(*)	"	2,5 _{abs} (1 _{rel})bar	N	barrel (inlet) system press. Cir.2
29	29	"	PT 2-4	*	*	*	"	- 1 bar _{rel}	N	pumps negative press. potential Cir.2
30	30	"	PT 2-5	*	*	—	"	+ 1 bar _{rel}	N	between Membranes of Circuit Pump Cir.2
31	31	"	PT 2-6	*	*	—	"	+ 1 bar _{rel}	N	inside fridge Cir.2

Abbreviations :

LCC Limit Card Control enable

L Level

Loc. Location

Ch. Channel

Tr. Trailer

rel. relative

abs. absolute

* installed

(*) inst. but different range

-- not installed

first edition	30.01.89	S. Masson	H1 GAS ALL: Ana In Card 1-1
last revision	12.04.94	S. Masson	III, Physikalisches Institut B
			RWTH Aachen

Tab. B2: Die Kanäle der Analogfilter- und Limitkarte 1 aus der "Distribution Box Level 6"

Analog Input Card 1 – 2 (AFB 2 + LID 2)

(card - plug)

No.	Ch. No.	Loc.	Logical Name	INPUT IN USE			Range		LCC	Comments
				GAS1	GAS2	GAS3	output	physical		
32	0	L6	PT 3-3	*	--	*	4...20 mA	+ 1 bar _{rel.}	N	inlet system press. Cir.3
33	1	"	PT 3-4	*	--	*	"	- 1 bar _{rel.}	N	pumps negative press. potential Cir.3
34	2	"	PT 4-3	*	--	*	"	+ 1 bar _{rel.}	N	inlet system press. Cir.4
35	3	"	PT 4-4	*	--	*	"	- 1 bar _{rel.}	N	pumps negative press. potential Cir.4
36	4	"	PT 5-3	--	--	*	"	+ 1 bar _{rel.}	N	inlet system press. Cir.5
37	5	"	PT 5-4	--	--	*	"	- 1 bar _{rel.}	N	pumps negative press. potential Cir.5
38	6	"	PT 6-1	*	*	*	"	2,5 bar _{abs.}	N	Pressure Transducer (Ambient absolut)
39	7		Free1A2						N	Free1A2
40	8	Tr.	TS 0-6	*	*	*	+/- 10 V	+/- 400 °C	N	Temp. Sensors inside chambers
41	9	"	TS 0-7	*	*	--	"	"	N	"
42	10	"	TS 0-8	*	*	--	"	"	N	"
43	11	"	TS 0-9	*	--	--	"	"	N	"
44	12	NOT YET CONNECTED								
45	13	"								
46	14	"								
47	15	"								
48	16	"								
49	17	"								
50	18	"								
51	19	"								
52	20	"								
53	21	"								
54	22	"								
55	23	"								
56	24	"								
57	25	"								
58	26	"								
59	27	"								
60	28	"								
61	29	"								
62	30	"								
63	31	"								

Abbreviations :

LCC Limit Card Control enable
 L Level
 Loc. Location
 Ch. Channel
 Tr. Trailer
 rel. relative
 abs. absolute

* installed
 (*) inst. but different range
 -- not installed

first edition	30.01.89	S. Masson	H1 GAS ALL: Ana In Card 1-2
last revision	20.04.93	S. Masson	III. Physikalisches Institut B RWTH Aachen

Tab. B3: Die Kanäle der Analogfilter- und Limitkarte 2 aus der "Distribution Box Level 6"

Analog Input Card 2-1 (AFB 3 + LID 3)

(card - plug)

No.	Ch. No.	Loc.	Logical Name	INPUT IN USE			Range		LCC	Comments
				GAS1	GAS2	GAS3	output	physical		
64	0	L6	LV+5	*	*	*	+5 V	<i>(dividers are on ana filter cards)</i>	Y	Low Voltage (Level 6) VME
65	1	"	LV+12	*	*	*	+12 V		Y	" VME
66	2	"	LV-12	*	*	*	-12 V	divider:	Y	" VME
67	3	"	LM+15	*	*	*	+15 V	1:2	Y	" MKS
68	4	"	LM-15	*	*	*	-15 V		Y	" MKS
69	5	--	NC				Not yet	connected	N	NC
70	6	--	NC				" "	"	N	NC
71	7	"	LS+24	*	*	*	+24 V	divider:	Y	Low Voltage Solenoid Valves
72	8	"	LD+24	*	*	*	+24 V	1:4	Y	" DDR
73	9	Tr.	LT+15	*	*	*	+15 V	divider:	Y	Low Voltage (Trailer) MKS
74	10	"	LT-15	*	*	*	-15 V	1:2	Y	" MKS
75	11	"	LT+24	*	*	*	+24 V	1:4	Y	" Solenoid Valves
76	12	"	PT8-1	*	*	*	0...1 V	1,3..bar _{abs.}	N	ambient press. Trailer MKS
77	13	"	Free1A3				Free for	trailer analog	N	Free1A3
78	14	"	TS 8-1	*	*	*	+/- 10 V	+/- 400°C	N	Temp. Sensor Trailer (Ambient)
79	15	"	TS 0-1	*	*	*	"	"	N	Temp. Sensors inside chambers
80	16	"	TS 0-2	*	*	*	"	"	N	"
81	17	"	TS 0-3	*	*	*	"	"	N	"
82	18	"	TS 0-4	*	*	*	"	"	N	"
83	19	"	TS 0-5	*	*	*	"	"	N	"
84	20	L7	TS 7-1	*	*	*	"	"	N	Temp. Sensor (Level 7) (Ambient)
85	21	L6	TS 6-1	*	*	*	"	"	N	Temp. Sensor (Level 6) (Ambient)
86	22	--	NC				Not yet	connected	N	NC
87	23	L6	Free2A3				Free for	temp. sensor	N	Free2A3
88	24	"	TS 1-6	*	<*>	--	+/- 10 V	+/- 400°C	N	Temp. Sensor Fridge < fridge 3 > Cir.1
89	25	"	TS 2-6	*	*	--	"	"	N	" Cir.2
90	26	"	TS 9-1	*	*	<*>	"	"	N	Temp. Sensor Cir.1+2 < fridge 4 > Deoxo 1
91	27	"	TS 9-2	*	*	<*>	"	"	N	< fridge 5 > Molsieve 1
92	28	"	TS 9-3	*	--	<*>	"	"	N	< fridge 6 > Deoxo S
93	29	"	TS 9-4	*	--	--	"	"	N	Molsieve S
94	30	"	TS 9-5	*	*	--	"	"	N	Deoxo 2
95	31	"	TS 9-6	*	*	--	"	"	N	Molsieve 2

Abbreviations :

LCC Limit Card Control enable
 L Level
 Loc. Location
 Ch. Channel
 Tr. Trailer
 rel. relative
 abs. absolute

* installed
 (*) inst. but different range
 -- not installed
 <*> different meaning

first edition	30.01.89	S. Masson	H1 GAS ALL: Ana In Card 2-1
last revision	12.04.94	S. Masson	III. Physikalisches Institut B RWTH Aachen

Tab. B4: Die Kanäle der Analogfilter- und Limitkarte 3 aus der "Distribution Box Level 6"

Analog Input Card 2-2 (AFB 4 + LID 4)

(card - plug)

No.	Ch. No.	Loc.	Logical Name	INPUT IN USE			Range		LCC	Comments	
				GAS1	GAS2	GAS3	output	physical			
96	0	L6	HM 1-1	*	--	--	0...10 V	-80... + 20°C	N	Hygro-Meter to chambers from chambers	GAS1 Cir.1
97	1	"	HM 1-2	*	--	--	"	dewpoint	N		GAS1 Cir.1
98	2	"	HM 1-3	--	*	--	0...20 mA	"	N	Hygro-Meter from chambers	GAS2 Cir.1
99	3	"	Free1A4						N	Free1A4	
100	4	"	HM 2-1	*	--	--	0...10 V	-80... + 20°C	N	Hygro-Meter to chambers from chambers	GAS1 Cir.2
101	5	"	HM 2-2	*	--	--	"	dewpoint	N		GAS1 Cir.2
102	6	"	HM 2-3	--	*	--	0...20 mA	"	N	Hygro-Meter from chambers	GAS2 Cir.2
103	7	"	HM 3-1	*	--	--	0...10 V	"	N	Hygro-Meter to chambers	GAS1 Cir.3
104	8	"	Free2A4						N	Free2A4	
105	9	"	IM 1-1	*	*	*?	0...10 V	Vol % C3H8/C2H6/C3H8?	N	Infrared Monitor (DDR Infralyth)	Cir.1
106	10	"	Free3A4						N	Free3A4	
107	11	"	IM 2-1	*	*	*?	0...10 V	Vol % C2H6/C2H6/CH4?	N	Infrared Monitor (DDR Infralyth)	Cir.2
108	12	"	Free4A4						N	Free4A4	
109	13	"	IM 3-1	--	--	*?	not yet	installed	N	Infrared Monitor (DDR Infralyth)	Cir.3
110	14	"	IM 4-1	--	--	*?	"	"	N	"	Cir.4
111	15	"	IM 5-1	--	--	*?	"	"	N	"	Cir.5
112	16	"	FM 1-3	--	--	*	0...5 V	100 NI/h	N	Mixing Flow Meter "i" ARGON	Cir.1
113	17	"	FM 1-4	--	--	*	"	"	N	Mixing Flow Meter "d" CH4	Cir.1
114	18	"	FM 1-5	--	--	*?	not yet	installed	N	not yet Installed!	Cir.1
115	19	"	FM 2-3	--	--	*	0...5 V	100 NI/h	N	Mixing Flow Meter "f" ARGON	Cir.2
116	20	"	FM 2-4	--	--	*	"	"	N	Mixing Flow Meter "e" CH4	Cir.2
117	21	"	FM 2-5	--	--	*?	not yet	installed	N	not yet Installed!	Cir.2
118	22	"	FM 3-3	--	--	*	0...5 V	100 NI/h	N	Mixing Flow Meter "h" ARGON	Cir.3
119	23	"	FM 3-4	--	--	*	"	"	N	Mixing Flow Meter "b" C2H6	Cir.3
120	24	"	FM 3-5	--	--	*?	not yet	installed	N	not yet Installed!	Cir.3
121	25	"	FM 4-3	--	--	*	0...5 V	100 NI/h	N	Mixing Flow Meter "g" ARGON	Cir.4
122	26	"	FM 4-4	--	--	*	"	"	N	Mixing Flow Meter "a" C2H6	Cir.4
123	27	"	FM 4-5	--	--	*?	not yet	installed	N	not yet Installed!	Cir.4
124	28	"	FM 5-3	--	--	*	0...5 V	100 NI/h	N	Mixing Flow Meter "j" ARGON	Cir.5
125	29	"	FM 5-4	--	--	*	"	"	N	Mixing Flow Meter "c" C2H6	Cir.5
126	30	"	FM 5-5	--	--	*?	not yet	installed	N	not yet Installed!	Cir.5
127	31	"	Free5A4						N	Free5A4	

Abbreviations :

LCC Limit Card Control enable
 L Level
 Loc. Location
 Ch. Channel
 Tr. Trailer
 rel. relative
 abs. absolute

* installed
 (*) inst. but different range
 -- not installed

first edition	30.01.89	S. Masson	H1 GAS ALL: Ana In Card 2-2 III. Physikalisches Institut B RWTH Aachen
last revision	20.04.93	S. Masson	

Tab. B5: Die Kanäle der Analogfilter- und Limitkarte 4 aus der "Distribution Box Level 6"

Anhang C: Elektronikeinschübe

Modul / Gerät	Typ	Hersteller, Kommentar
Crate Master	V02A	Eigenbau III. Phys. Inst. RWTH Aachen ([AEE86]), Motorola 68000 CPU, 12 MHz clock, externe Interrupt Möglichkeiten [COM87]
CP Terminator	CP	Eigenbau III. Phys. Inst. RWTH Aachen, Anschluß CTY Terminal; On-, Reset- und Abort-Funktion für Crate Master
Graphik Controller	VGPM502	PEP Modular Computers, RGB-Graphik, Auflösung 1024 x 1024 Bildpunkte, Anschalten der roten Farbe auf dem gesamten Bildschirm im Falle eines Prozessorfehlers od. Super-Alarm [VGPM5]
Leistungstreiber	CDD	Eigenbau III. Phys. Inst. RWTH Aachen, TTL-Signale für 'Trailer' Monitor
2x Analog Eingang	XVME560	XYCOM, A/D-Wandler, program. Vorverstärker, 64 Kanäle, Auflösung 12 bit [XVME5] /*
2x Digitale Ein- und Ausgabe	DI/O	Eigenbau III. Phys. Inst. RWTH Aachen, Ausschaltung aller 2x32 Ausgänge bei Prozessorfehler WD oder Alarmen [COM88] /*
Dynamisches RAM	XVME102	XYCOM, Kapaz. 1 Mb, u. a. Histogrammierung der Analogwerte [XVME1]
2x schneller Speicher	SPY-M	Eigenbau III. Phys. Inst. RWTH Aachen, Rate 12 Mb/s, 2 Mb RAM, EPROM mit Programm, Kalender, batteriegepuffert [COM91]
Analog Ausgang	MPV904	Burr-Brown, 16 Analog Ausgänge für Flow-Controller Steuerung (nur Gas 3) [MPV90] /*
serielle Schnittstellen RS232	VME48200	BICC-VERO, Vierfachschnittstelle für Terminals und Drucker, 'User1...4' [VME48]
" " " (Alternative)	XVME400	XYCOM, Vierfachschnittstelle, 'User 1...4' [XVME4]
Schnittstelle RS232 -> RS422	RS4232	Eigenbau III. Phys. Inst. RWTH Aachen, direkter Anschluß für Macintosh Computer
Stromversorgung	Power	Coutant (England), +5V, +/-15V für VME Crate
2x Terminal VT200	QVT 202	QUME, Raum 601 und Trailer [QVT20]
2x Graphik-Monitor	Multisync II	NEC, Raum 601 und Trailer [MULTI]
Drucker	FX800	Epson, Logbuch-Ausdruck in festen Zeitintervallen und Protokoll für Steuerbefehle [FX800]
/* Aufgabe und Zuordnung der Kanäle siehe Anhang B		

Tab. C1: Module und Geräte des zentralen VME Crates zur Steuerung eines Gassystems, Steuerkonsole in Raum 601 (genauere Beschreibung in [COM89]).

Anzahl	Modul	Typ	Anzahl der Kanäle pro Modul / Kommentar
4	Limit Detektor	LID	16 Hardware Limit Überwachung mit Reset
4	Analog Filter Board	AFB	16 Ausfiltern von Störsignalen in den analogen Eingangssignalen
1	Konverter	PT100	16 Konverter für PT 100 Temperatur Meßwiderstände
2	Treiber	VDR	16 für Ventile, Pumpen und Heizungen
1	Analog Ausgang	AO	16 Analog Ausgänge (nur Gas 3)
1	Koppler	ISO-AMP	14 potentialfreies Einspeisen von Fremdanalogwerten (Detektortemperaturen, nur Gas 2)
1	Limit Alarm	LA	1 Hardware Limit Alarmausgang

Dieser Einschub sowie die enthaltenen Module sind ausschließlich Eigenbauten des III. Physikalischen Instituts der RWTH Aachen [AEE86].

Tab. C2: Module der "Distribution Box Level 6" in Steuerkonsole Raum 601 [CMA92].

Anzahl	Modul	Typ	Anzahl der Kanäle pro Modul / Kommentar
1	Konverter	PT100	16 Konverter für PT 100 Temperatur-Meßwiderstände
1	Treiber	VDR	16 für Ventile
1	Power Supply	LT+24	1 +24V für Ventile (Hersteller: Schroff)
2	Power Supply	LT±15	1 ± 15V für Druckwandler (Hersteller: Schroff)

Dieser Einschub sowie die Module PT100 und VDR sind Eigenbauten des III. Physikalischen Instituts der RWTH Aachen [AEE86].

Tab. C3: Module der "Distribution Box Trailer" im Trailerrack [CMA89].

Anzahl	Modul	Typ	Anzahl der Kanäle pro Modul / Kommentar
3	Power Supply	L...	1 +24V für Pumpen, Ventile, Druckdosen (Hersteller: Schroff)
2	Power Supply	L...	1 ±15V für Druckdosen (Hersteller: Schroff)
1	Terminalswitch	F58	6 Verbindung Desynet [MICOM], Sammler in Gas 1
3 / 3	Terminal / Graphik	TCM	1/1 Sammler und Multiplexer zur Übertragung von Raum 601 zum Trailer in Gas 2 [AEE86]
3	Softalarm	LA...	4 Softwarealarme (I,W,A,SA) für BBL3; Sammelstation in Gas 3 [AEE86]
3	Hardalarm	IWA...	1 Hardwarealarm (SA) für BBL3; Sammelstation in Gas 3 [AEE86]

Tab. C4: Weitere Einheiten in den Steuerkonsolen im Raum 601.

Anhang D: Multipositionsventile für den GC

FMV-Multiport		Leitung	Gassystem	Kammer- name	Kommentar
Paar	Nr.	Nr.	Kreislauf		
0	E	--	--	"vom GC"	gemeinsamer Einlaß
	A	--	--	"zum GC"	gemeinsamer Auslaß
1	1	--	--	--	vom gem. Auslaß <i>EMV</i>
	2	--	--	--	gemeinsamer Auspuff
2	3	157	FT - GAS I	Radiale 0,1,2	"from chamber"
	4	158	Kreislauf 2		
3	5	153	FT - GAS I	F-MWPC & Planare 0,1,2	"from chamber"
	6	154	Kreislauf 1		
4	7	257	CJ - GAS II	CJC 2 und/ oder CJC 1	"from chamber"
	8	258	Kreislauf 2		
5	9	253	CJ - GAS II	CJC 1 und/ oder CJC 2	"from chamber"
	10	254	Kreislauf 1		
6	11	155	FT - GAS I	Radiale 0,1,2	"to chamber"
	12	156	Kreislauf 2		
7	13	151	FT - GAS II	F-MWPC & Planare 0,1,2	"to chamber"
	14	152	Kreislauf 1		
8	15	255	CJ - GAS II	CJC 2 und/ oder CJC 1	"to chamber"
	16	256	Kreislauf 2		
9	17	251	CJ - GAS II	CJC 1 und/ oder CJC 2	"to chamber"
	18	252	Kreislauf 1		
10	19	frei		Reserve 1	z.B. Eichgase für den GC, Anschluß für andere Gassysteme, ...
	20	"			
11	21	frei		Reserve 2	
	22	"			
12	23	frei		Reserve 3	
	24	"			

Tab. D1: Anschlußbelegung (2 x 12 + 2) des Fluß-Multipositions-Ventils *FMV* im Probenverteiler des Gaschromatographen

EMV Nr.	Leitung Nr.	Gassystem	Kreislauf Nr.	Kammername	Kommentar
A	--	--	--	--	zum FMV
1	--	--	--	--	Helium
2	--	--	--	--	"Vent"
3	362	CT - GAS III	4	COP	"from chamber"
4	357	CT - GAS III	2	COZ	"from chamber"
5	353	CT - GAS III	1	CIZ	"from chamber"
6	360	CT - GAS III	3	CIP	"from chamber"
7	364	CT - GAS III	5	B-MWPC	"from chamber"
8	160	FT - GAS I	3	Radiatoren	"from chamber"
9	162	FT - GAS I	4	Spare	"from chamber"
10	361	CT - GAS III	4	COP	"to chamber"
11	355	CT - GAS III	2	COZ	"to chamber"
12	351	CT - GAS III	1	CIZ	"to chamber"
13	359	CT - GAS III	3	CIP	"to chamber"
14	363	CT - GAS III	5	B-MWPC	"to chamber"
15	159	FT - GAS I	3	Radiatoren	"to chamber"
16	161	FT - GAS I	4	Spare	"to chamber"

Tab. D2: Anschlußbelegung (1 x 16 + 1) des Einbahn-Multipositions-Ventils EMV im Probenverteiler des Gaschromatographen

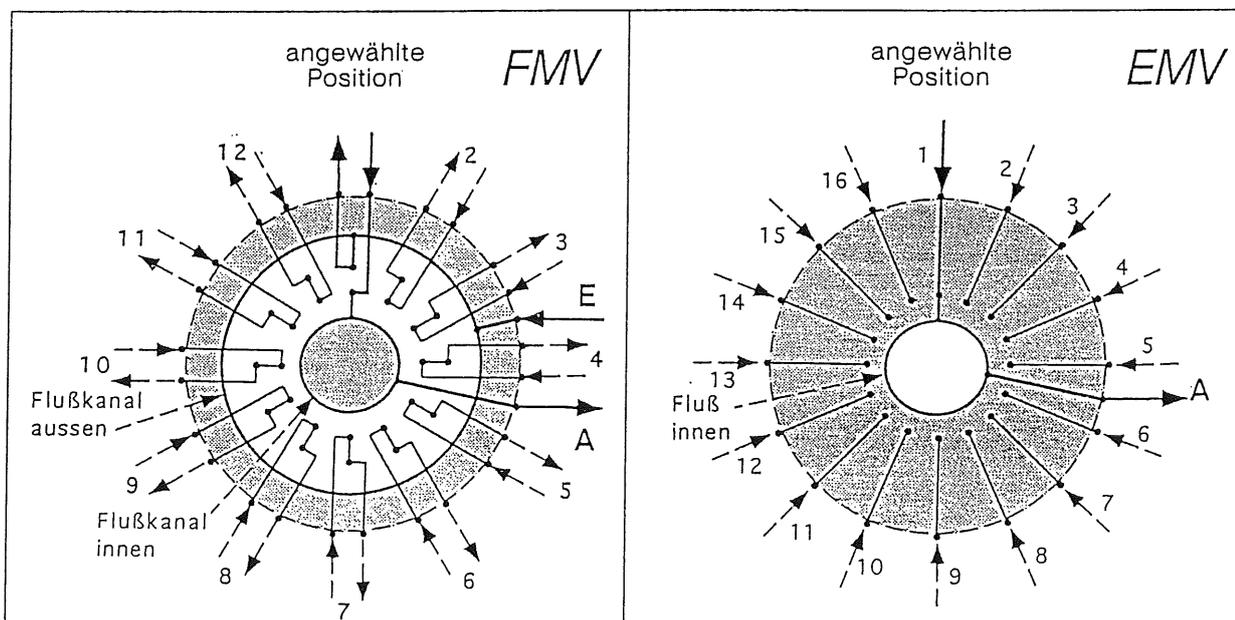
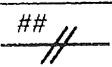
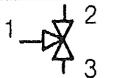
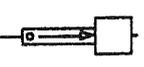
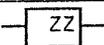
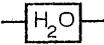
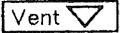


Abb. D1: Querschnitt durch ein FMV (links) und ein EMV (rechts) aus [DRE91]

Anhang E: Verrohrungspläne

Nachfolgend sind die wichtigsten Verrohrungspläne der Gassysteme aus dem internen Papier [MAG01] zusammengestellt. Wie in internationalen Experimenten üblich, sind die Bezeichnungen in englischer Sprache (siehe auch Anhang A). Mit einer Liste der dargestellten Pläne und einer Erklärung der verwendeten Schaltsymbole (Tab. E1) beginnt dieser Anhang. Alle Verbindungsleitungen der Gassysteme, die nicht innerhalb eines Gas-schranks verlaufen, sind nach einem festen Zahlenschema geordnet. Diese Benummerung ist zur schnelleren Orientierung in allen drei Gassystemen identisch. Um die Leitungen der drei Systeme unterscheiden zu können, wird den Zahlen aus Tab. E2 die Nummer des Gassystems vorangestellt. "110" bedeutet also: die erste "1" für Gassystem I, die folgenden Zahl "10" steht für Abgasleitung.

<i>Beschreibung</i>	<i>Zeichn. Nr</i> <i>H1 GAS...</i>	<i>Abb.</i> <i>Nr.</i>
Gassystem I:		
Hauptteil Kreislauf 1 für Vorwärts MWPCs und Planare Driftk.	1-01	E1
Hauptteil Kreislauf 2 für Vorwärts Radiale Driftkammern	1-02	E2
Einlaßteil Kreislauf 1 und 2	1-05	E3
Reinigerrack für die Kreisläufe 1 und 2	1-06	E4
Hauptteil Kreislauf 3 für Vorwärts Radiatoren	1-03	E5
Hauptteil Kreislauf 4 für Vorwärtskammern Reservekreislauf	1-04	E6
Trailerrack, für alle Kreisläufe zusammen	1-08	E7
Gassystem II:		
Hauptteil Kreislauf 1 für zentrale Jetkammer 1 CJC1 (und CJC2)	2-01	E8
Hauptteil Kreislauf 2 für zentrale Jetkammer 2 CJC2 (und CJC1)	2-02	E9
Einlaßteil Kreislauf 1 und 2	2-03	E10
Reinigerrack für die Kreisläufe 1 und 2	2-04	E11
Trailerrack, für beide Kreisläufe	2-06	E12
Gassystem III:		
Hauptteil, für alle Kreisläufe	3-01	E13
Trailerrack, für alle Kreisläufe identischer Aufbau	3-02	E14
Additivstation:		
Verrohrungsplan für den Anschluß an Gassystem I, II und III	FS 1-01	E15

Symbol	log. Name	Erklärung
	--	Kupferrohr, Außendurchm. 10 mm, Wandstärke 1 mm, abweichende Durchmesser sind besonders gekennzeichnet
		Leitung mit Schottverschraubung (Swagelok®), ## Nummer der Leitung
		Geradeverbinder (Swagelok®)
		hartgelötete oder geschweißte Verbindung
		T-Verbinder (Swagelok®)
		Kreuzverbinder (Swagelok®)
	VX-Y	Kugelhahnventil (Whitey®) mit zwei Anschlüssen; Funktion: Verbindung 1=>2 oder geschlossen
	VX-Y	Kugelhahnventil (Whitey®) mit drei Anschlüssen; Funktionen: Verb. 1=>2, od. 1=>3 od. geschlossen
	MVX-Y	mechanisches Federventil [NUPCA]; Funktion: öffnet ab eingestelltem Überdruck
	SVX-Y	Magnetventil mit 24V- Spule, Funktion: stromlos geschlossen, (stromlos offen am Trailer!)
	FLX-Y	mechanischer Schwebekörper-Flußmesser mit Nadelventil [PORF1]
	FMX-Y	elektronischer Flußmesser (=Druckwandler)
	FMX-Y	Massenflußmesser [HIF12]
	FCX-Y	elektronischer Massenflußregler/-messer in einem Gehäuse [HIF12]
	PGX-Y	mechanischer Druckmesser
	PTX-Y	elektronischer Druckmesser für Absolut- oder Relativdruck "abs./rel.", [MK122, MK223, VDW01]
	CPX-1	Kreislaufpumpe mit Doppel-/Einfachmembrane [KNF01,...02]
	VPX-1	Vakuumpumpe [EDWE2]
	IMX-Y	Infrarot-Meßgerät für die Komponente ZZ [INFRA]
	HMX-Y	Hygrometersensor [PAN-M]
	Vent	Abgasleitung, führt zum Dach des Experimentgebäudes
		Gasvorratsbehälter für Gas XX

Tab. E1: Zeichenerklärung der verwendeten Schaltsymbole

<i>Ver- und Entsorgungsleitungen für die Hauptteile der Gassysteme in Raum 601:</i>	
NUMMER	VERBINDUNG / ZWECK
1 bis 9 +30	Leitungen zur Gasversorgung von Stockwerk 7 in den Raum 601
10	"Vent" = Abluft, Gasauslaß an die Atmosphäre auf dem Dach
12	"oil vent" = ölhaltiges Abgas der Vakuumpumpen
<i>Vom Hauptteil der Kreisläufe in Raum 601 zur Verteilung auf dem Trailer:</i>	
13 + 14	Kreislauf 1: von Raum 601 -> Verteilung Trailer und Rückleitung
... bis ...	Kreislauf 2 bis Kreislauf 4
21 + 22	Kreislauf 5: 601 -> Trailer + Trailer -> 601
<i>Innerhalb der Kreisläufe im Gasraum 601:</i>	
11	Vakuumsaugleitung
25 bis 28	grobe mechanische Drucküberwachung der Detektorrückleitung
31, 32	Einlaß Kreislauf 1 / 2
33 + 34	Rack Kreislauf 1 -> Reinigerrack und zurück
35 + 36	Rack Kreislauf 2 -> Reinigerrack und zurück
37 + 38	Rack Kreislauf 1 -> Additivstation und zurück
39 + 40	Rack Kreislauf 2 -> Additivstation und zurück
41	Helium für Zwischenmembrane in Kreislaufpumpe
<i>Zur Verbindung mit dem Gaschromatographen und dem Sauerstoffanalysator:</i>	
51 + 52	Kreislauf 1: Hin- und Rückleitung "zur Kammer"; Typ "Fluß"
53 + 54	Kreislauf 1: Hin- und Rückleitung "von der Kammer"; "
55 + 56	Kreislauf 2: Hin- und Rückleitung "zur Kammer"; "
57 + 58	Kreislauf 2: Hin- und Rückleitung "von der Kammer"; "
59 + 60	Kreislauf 3: Hinleitung "zur und von der Kammer"; Typ "Einbahn"
61 + 62	Kreislauf 4: Hinleitung "zur und von der Kammer"; "
63 + 64	Kreislauf 5: Hinleitung "zur und von der Kammer"; "
<i>Verbindungen zwischen Verteiler auf dem Trailer und den Kammern:</i>	
71 bis 79	Druckmeßleitung für Kammer Nr. 1 bis Kammer Nr. 9
81 + 82	Hin- und Rückleitung für Kammer Nr. 1
... bis ...	" " " " Kammern Nr. 2 bis Nr. 8
97 + 98	Hin- und Rückleitung für Kammer Nr. 9
99	Verbindung der Magnetventile mit dem Argon-Bubbler

Tab. E2: Nummernschema der Verbindungsgasleitungen

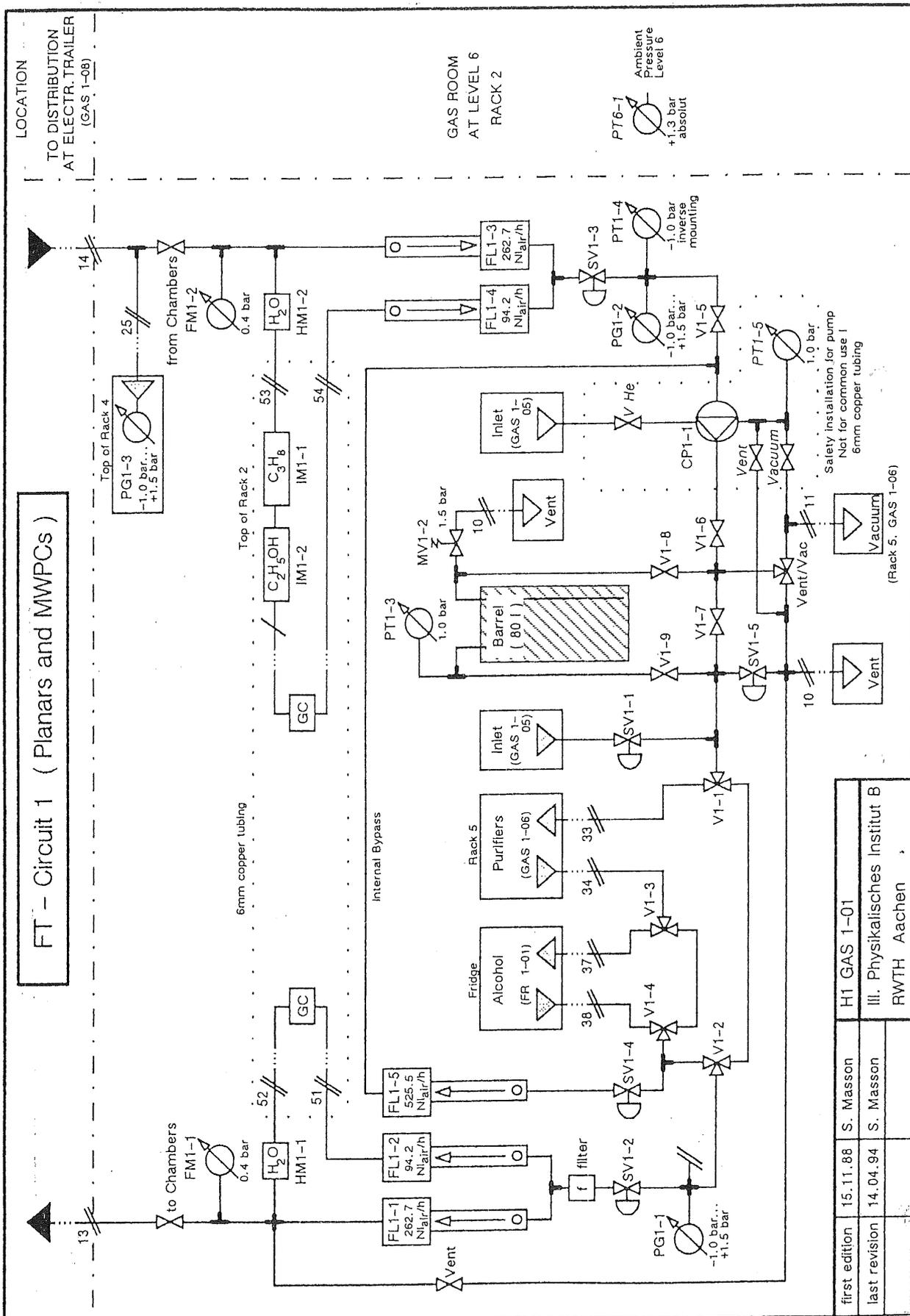


Abb. E1: Gas. I, Kreisl. 1, Hauptteil für Vorwärts MWPCs und Planare Driftkammern

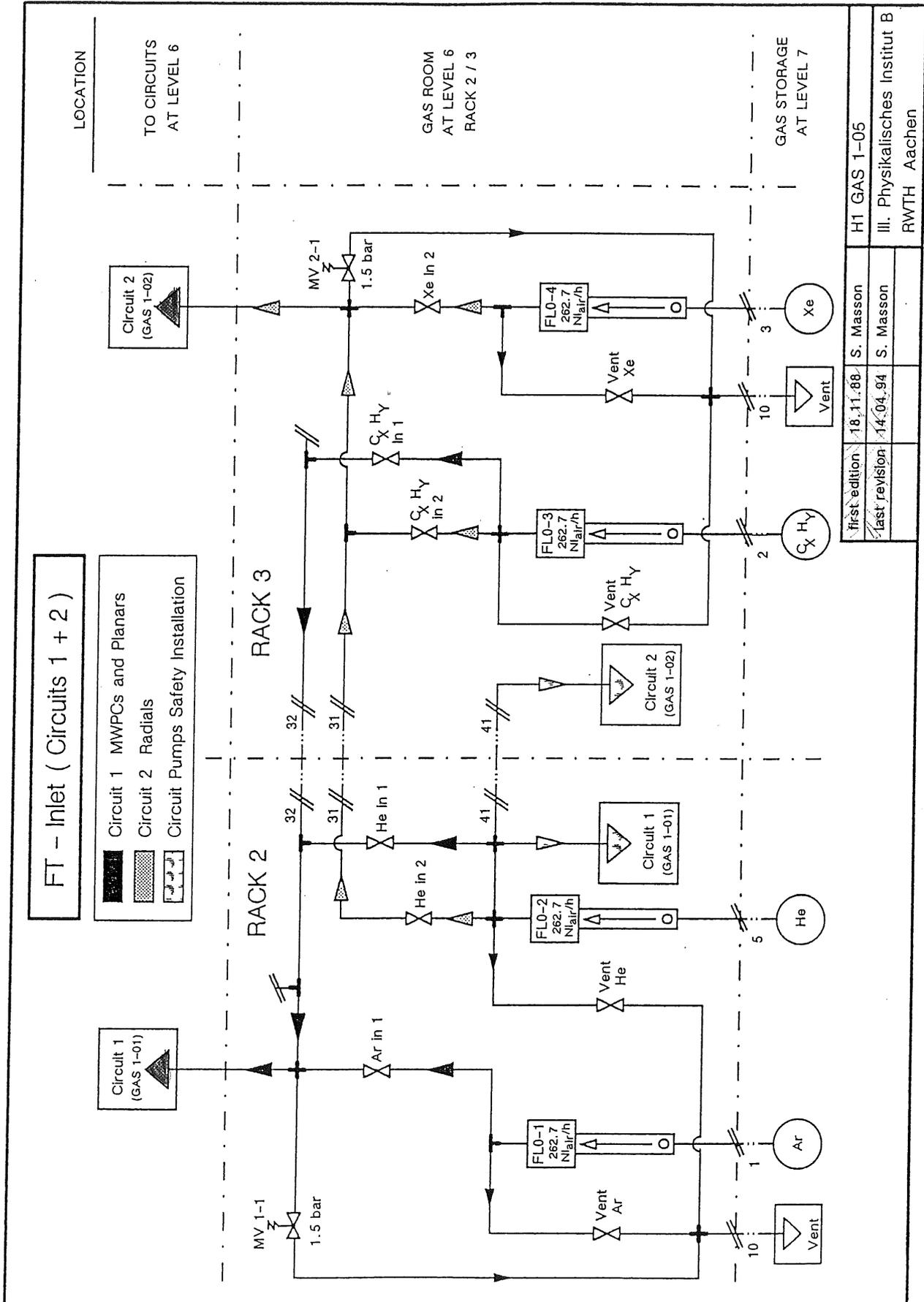


Abb. E3: Einlaßteil Gassystem I, Kreislauf 1 und 2

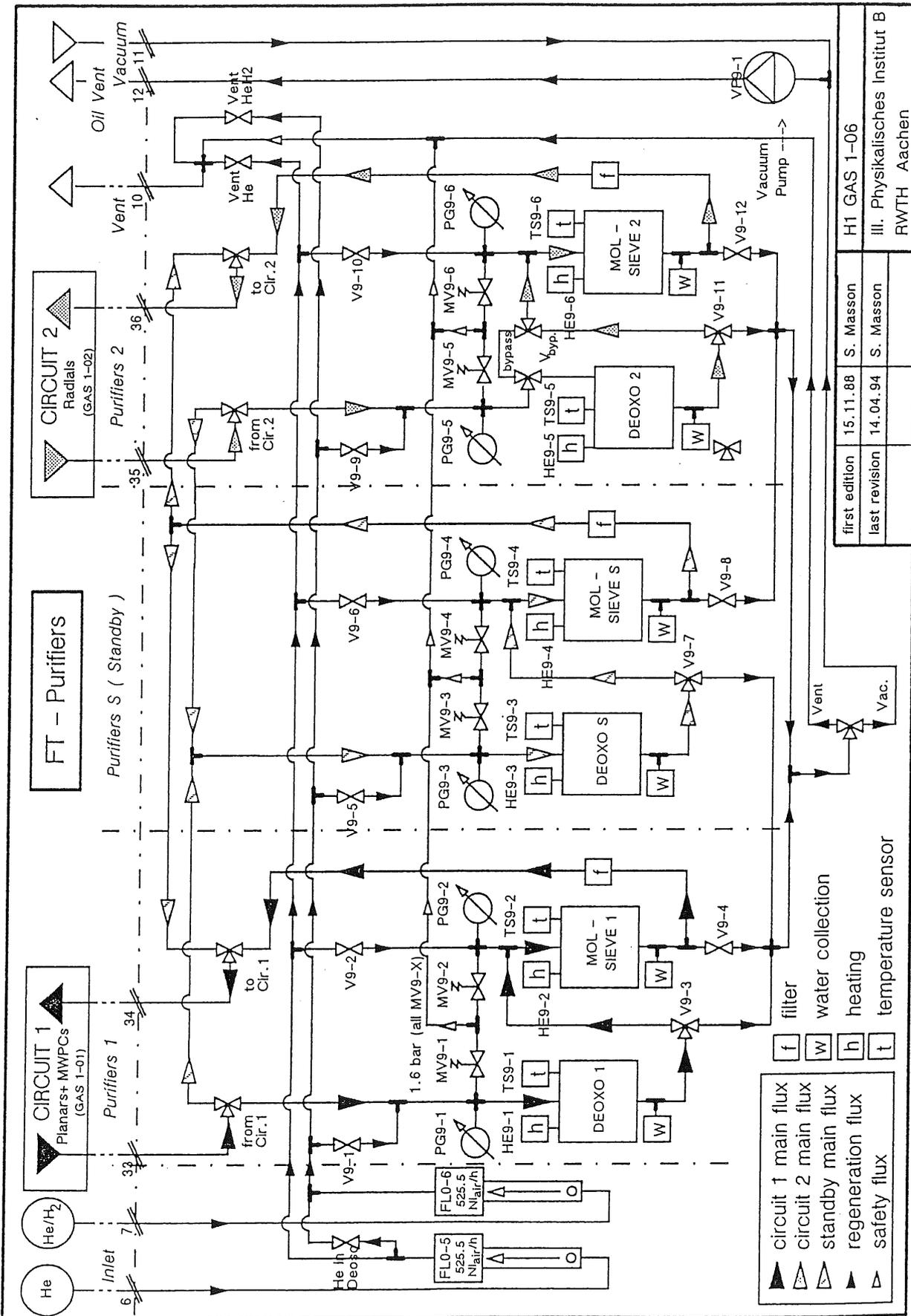


Abb. E4: Reinigerrack für die Kreisläufe 1 und 2 in Gassystem I

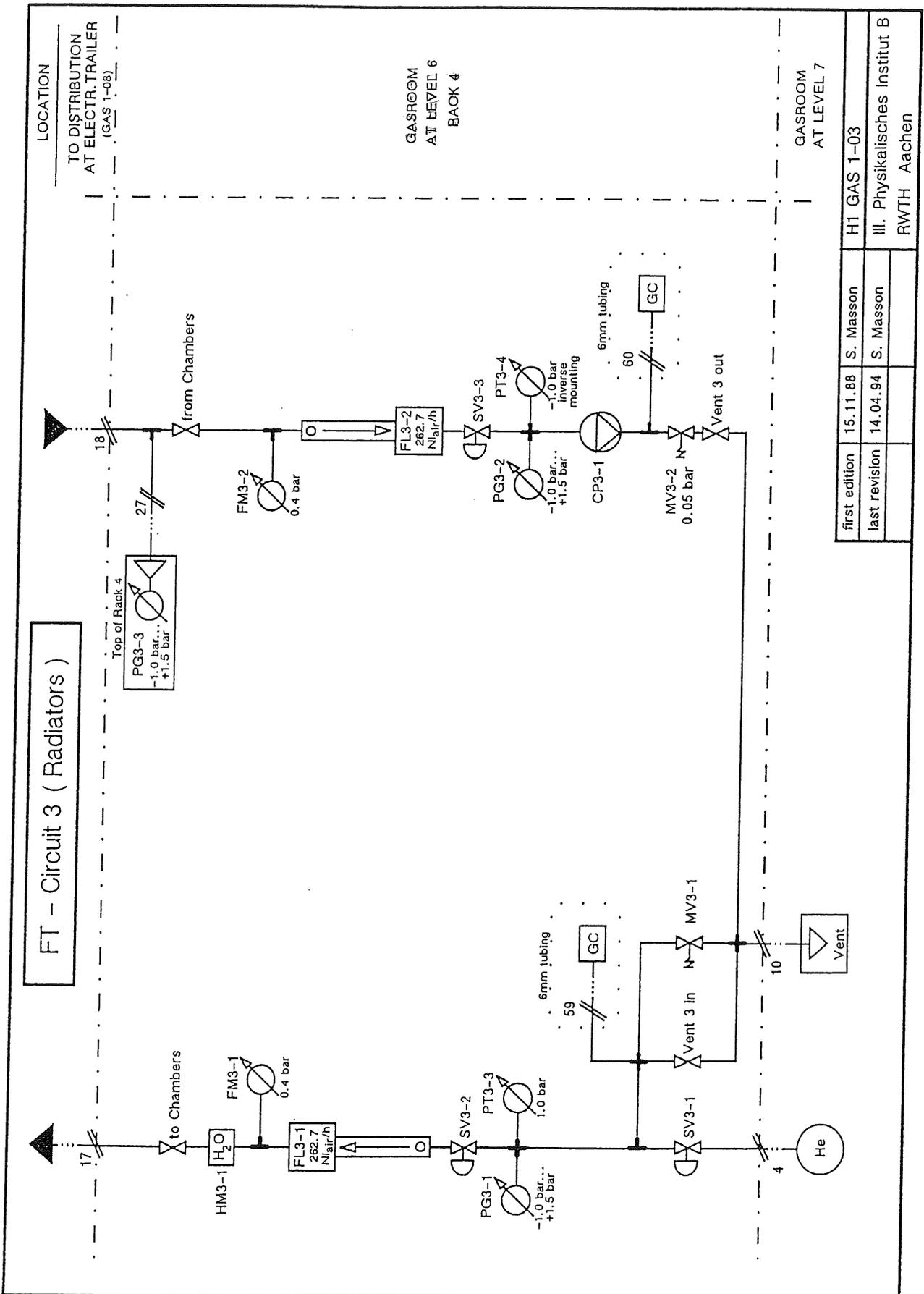


Abb. E5: Hauptteil Gassystem I, Kreislauf 3 für Vorwärts Radiatoren

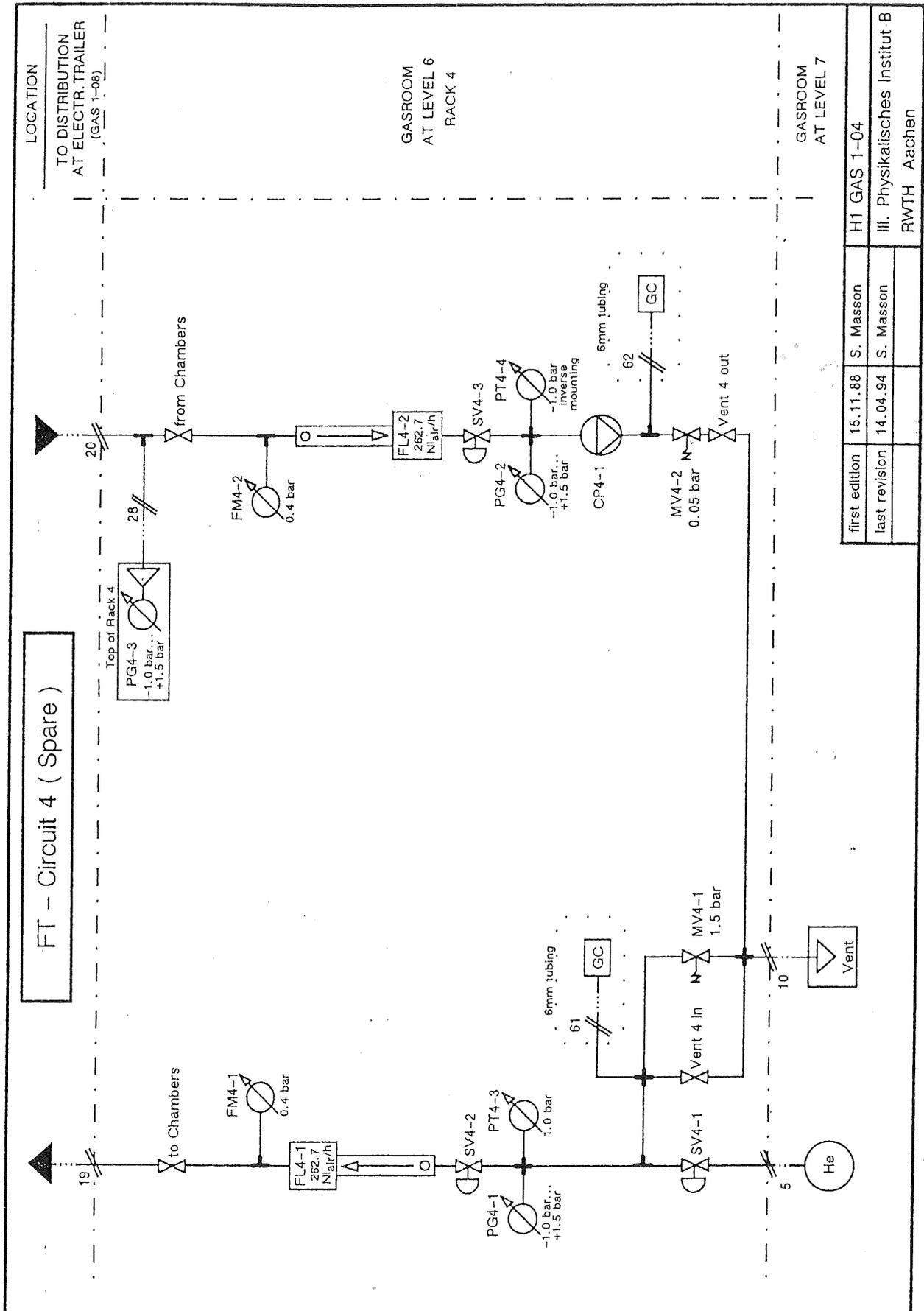
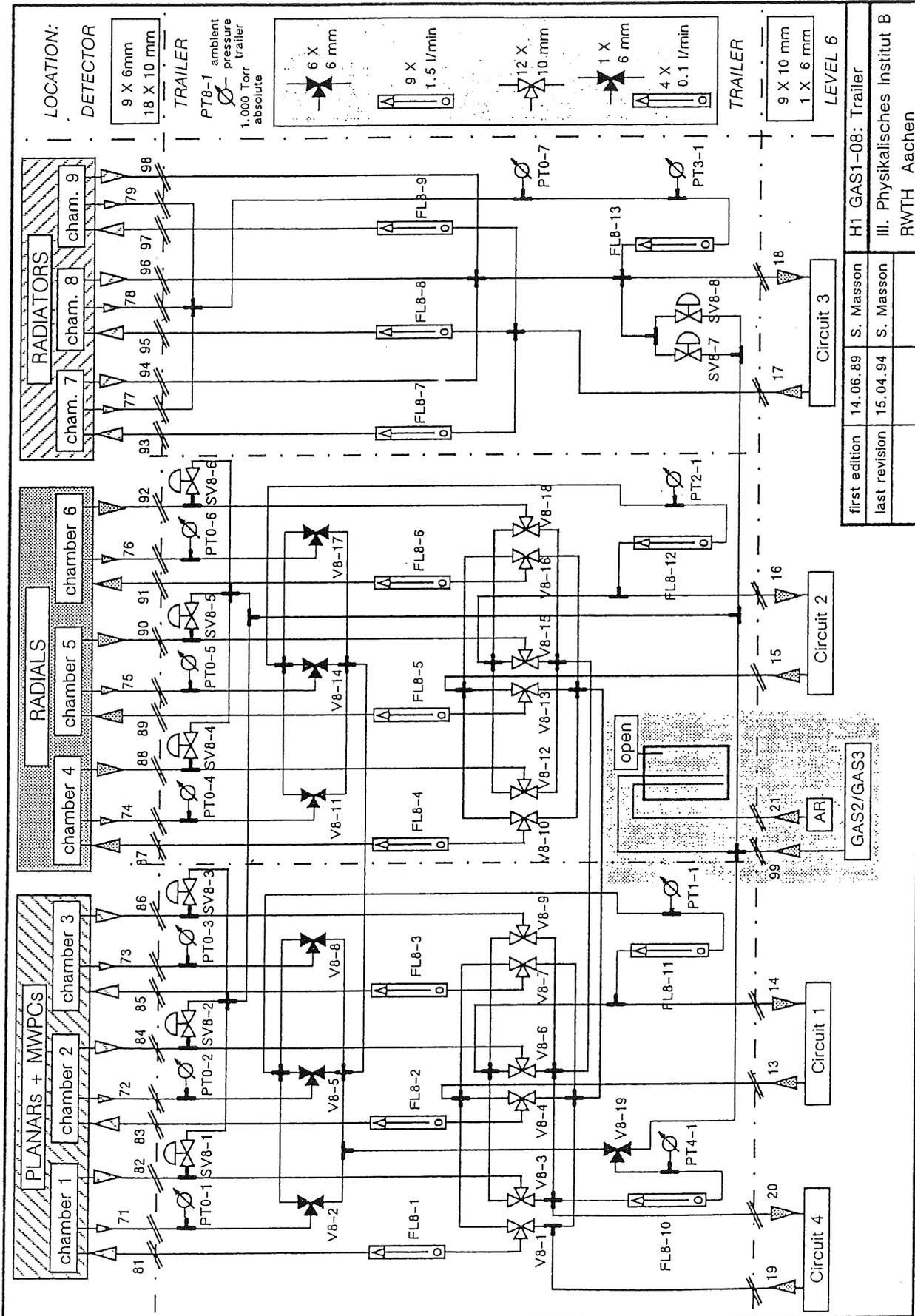
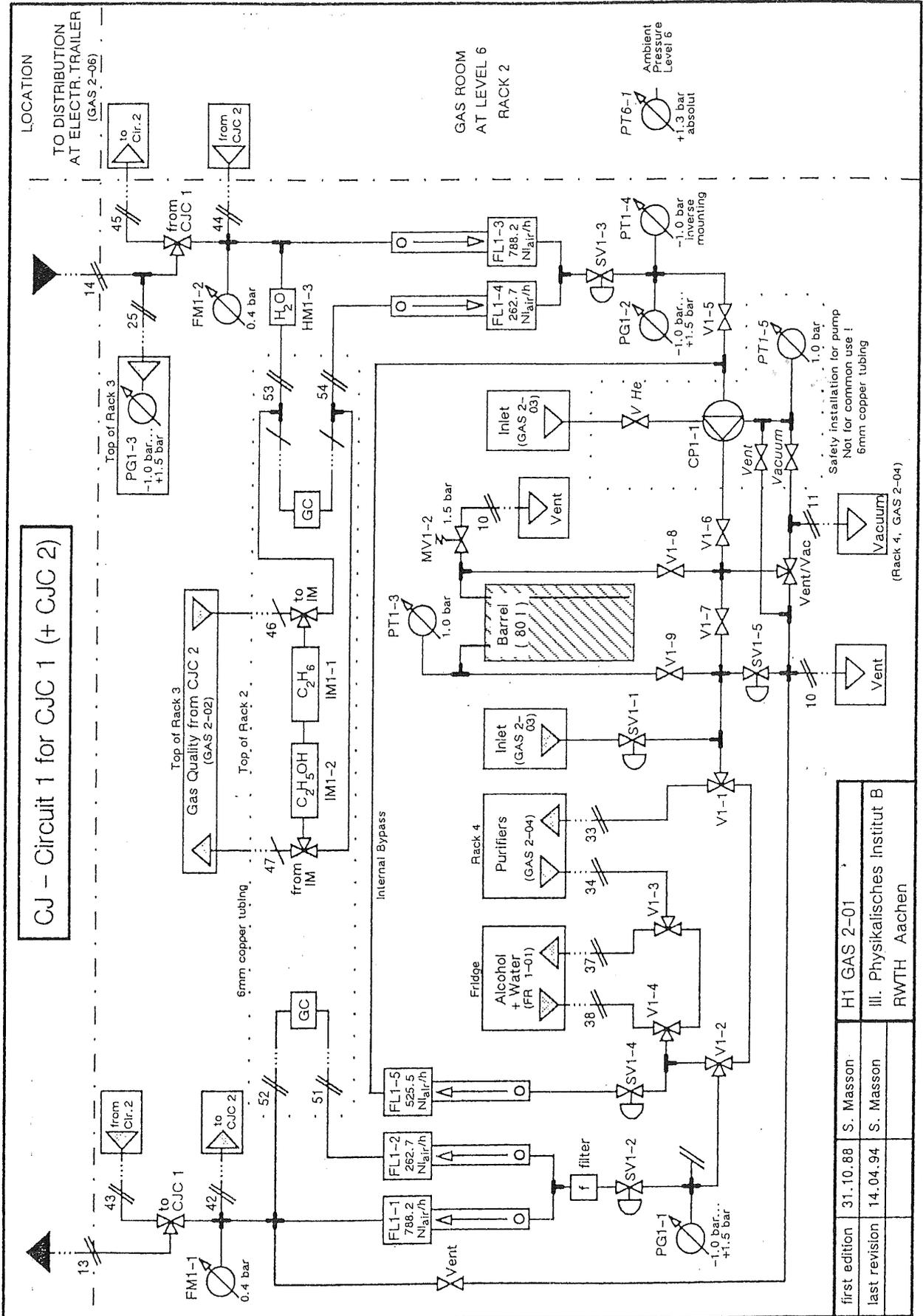


Abb. E6: Hauptteil Gassystem I, Kreislauf 4 Reservekreislauf für Vorwärtskammern



first edition	14.06.89	S. Masson	H1 GAS1-08: Trailer
last revision	15.04.94	S. Masson	III. Physikalisches Institut B RWTH Aachen

Abb. E7: Gassystem I, Trailerrack, für alle Kreisläufe gemeinsam



CJ - Circuit 1 for CJC 1 (+ CJC 2)

first edition	31.10.88	S. Masson	H1 GAS 2-01
last revision	14.04.94	S. Masson	III. Physikalisches Institut B RWTH Aachen

Abb. E8: Gassystem II, Kreislauf 1, Hauptteil für zentrale Jetkammer 1 CJC1 (und CJC2)

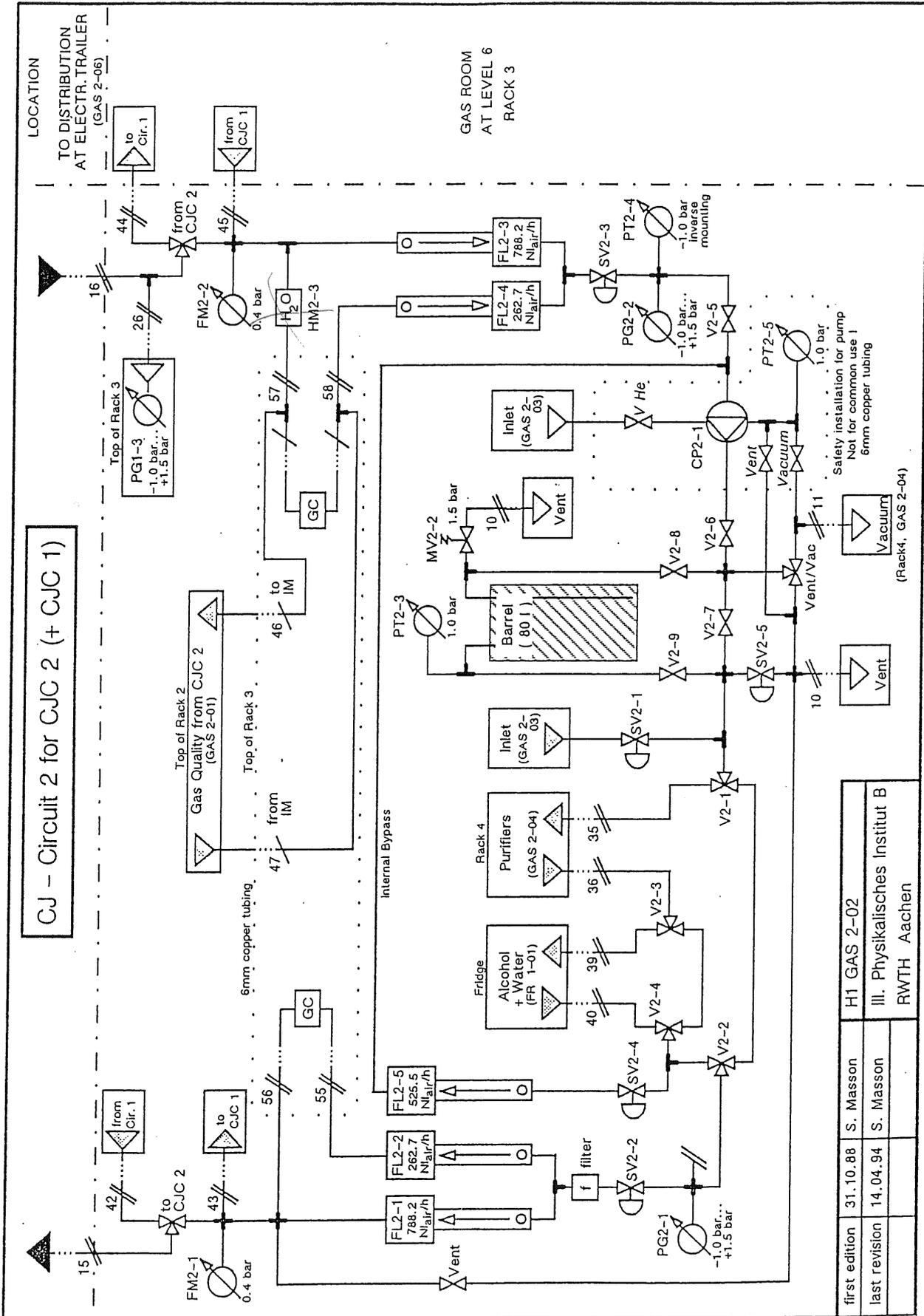


Abb. E9: Gassystem II, Kreislauf 2, Hauptteil für zentrale Jetkammer 2 CJC2 (und CJC1)

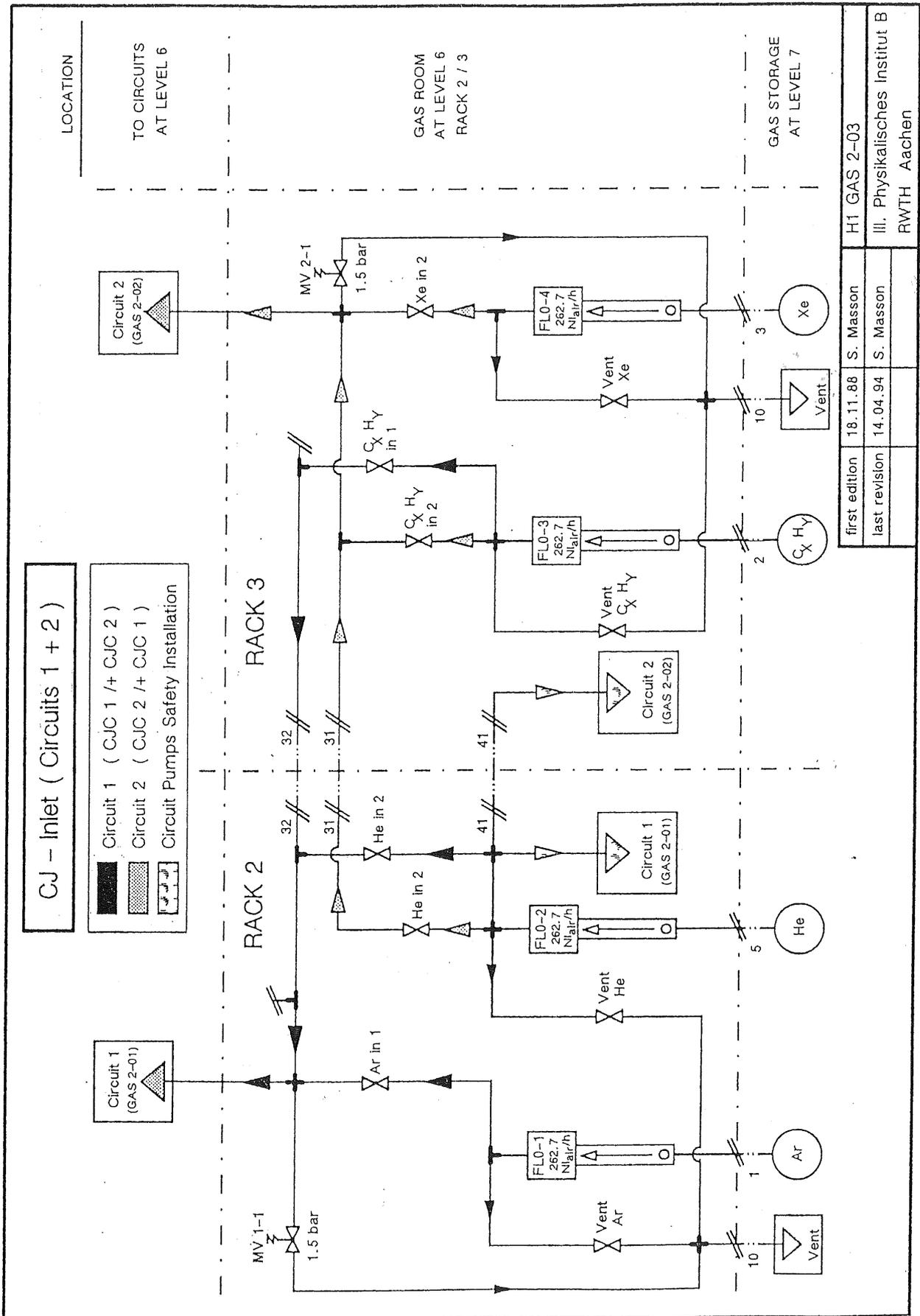
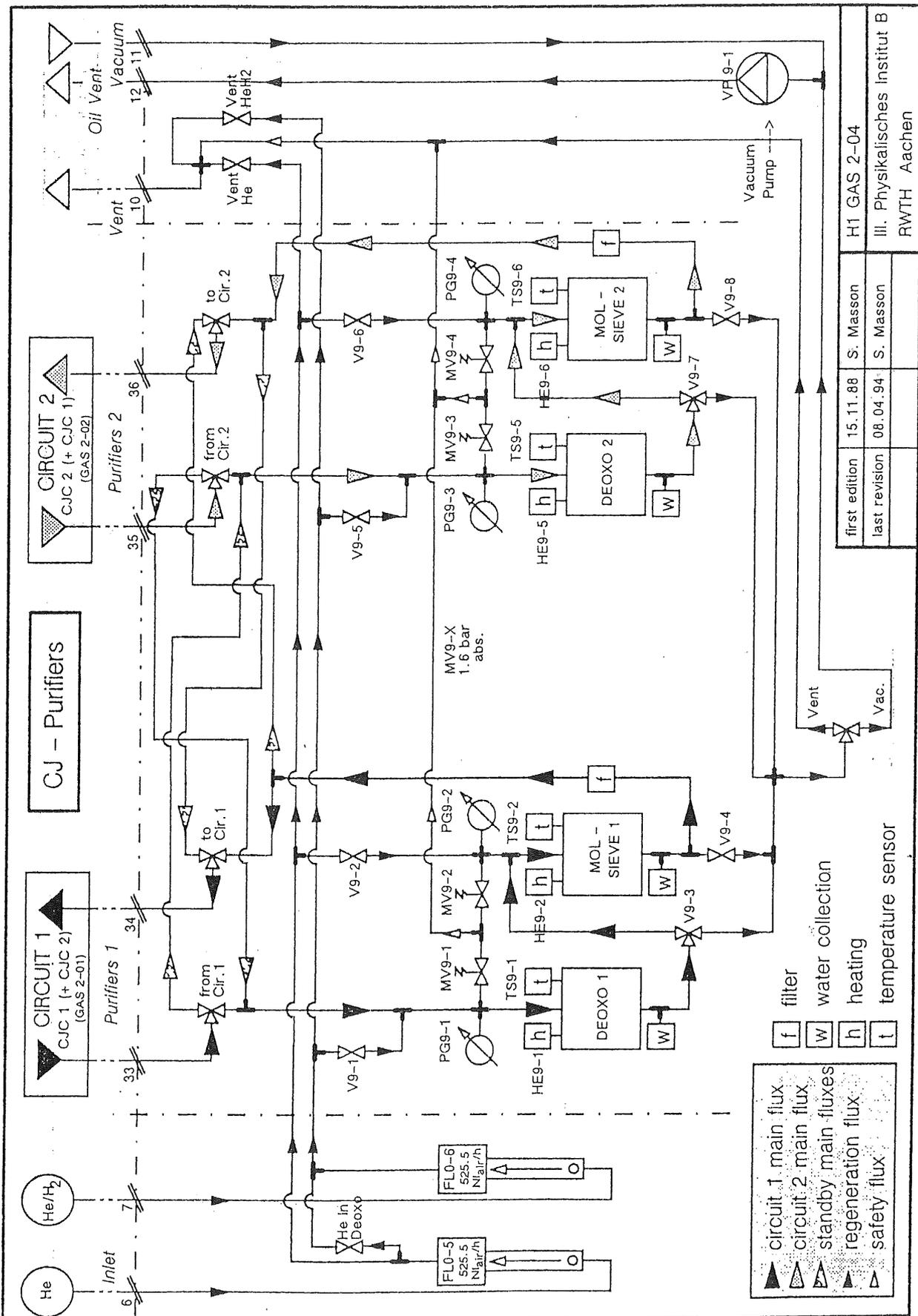


Abb. E10: Gassystem II, Einlaßteil Kreislauf 1 und 2

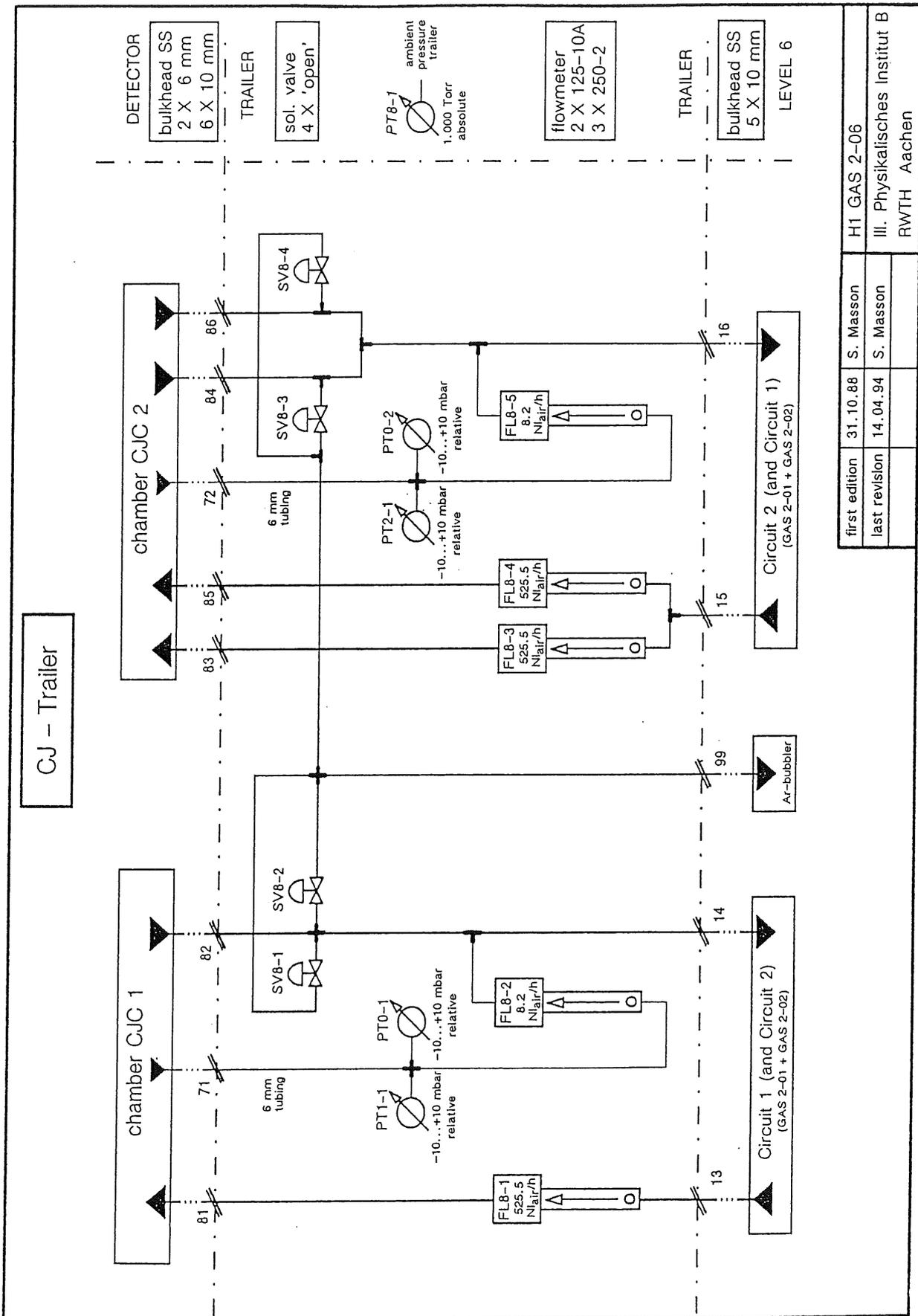


first edition	15.11.88	S. Masson
last revision	08.04.94	S. Masson

H1 GAS 2-04
 Ill. Physikalisches Institut B
 RWTH Aachen

- ▲ circuit 1 main flux
- ▲ circuit 2 main flux
- ▲ standby main fluxes
- ▲ regeneration flux
- ▲ safety flux
- f filter
- w water collection
- h heating
- t temperature sensor

Abb. E11: Gassystem II, Reinigerrack für die Kreisläufe 1 und 2



first edition	31.10.88	S. Masson	H1 GAS 2-06
last revision	14.04.94	S. Masson	Ill. Physikalisches Institut B RWTH Aachen

Abb. E12: Gassystem II, Trailerrack, für beide Kreisläufe

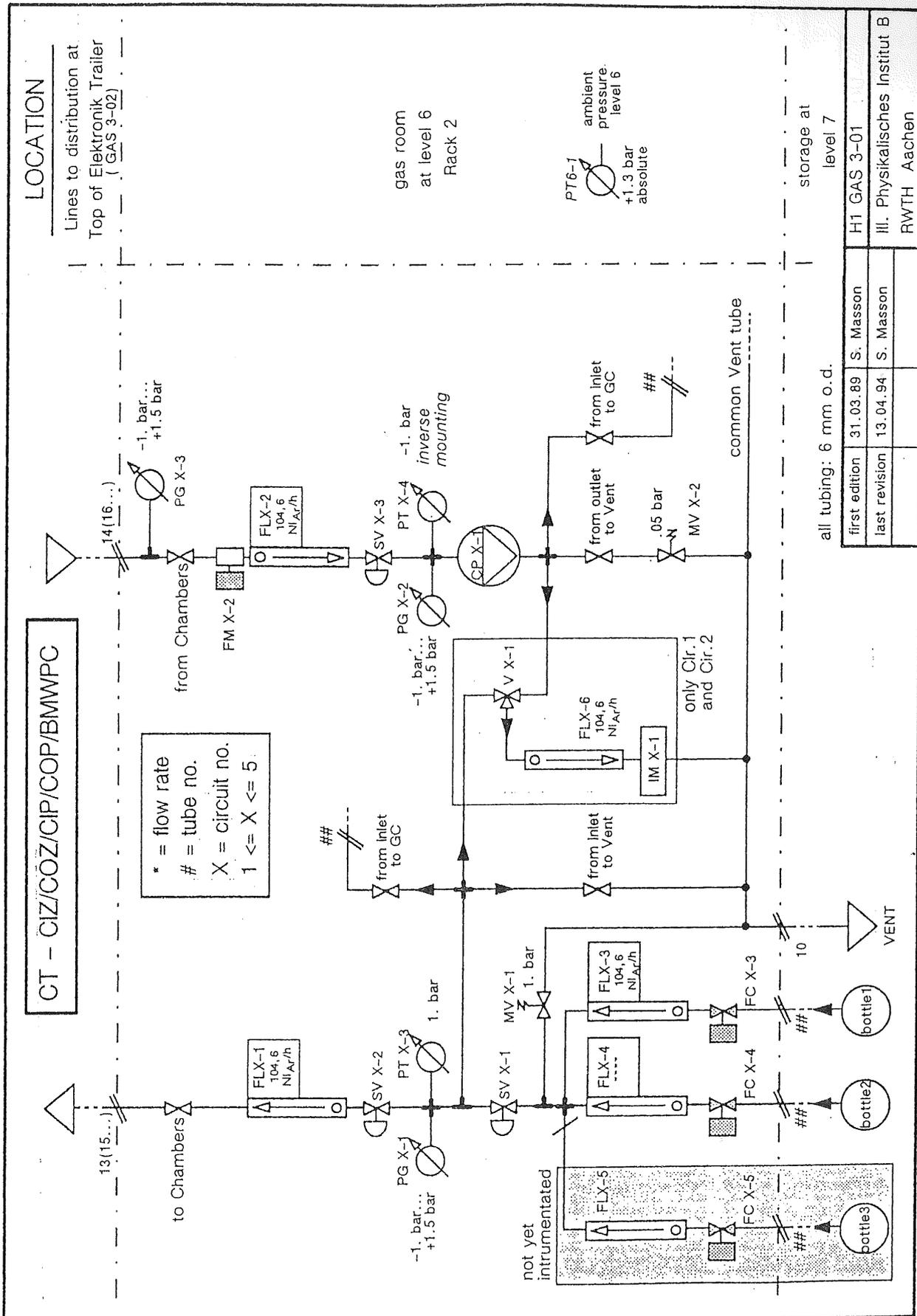


Abb. E13: Gassystem III, Hauptteil, für alle Kreisläufe

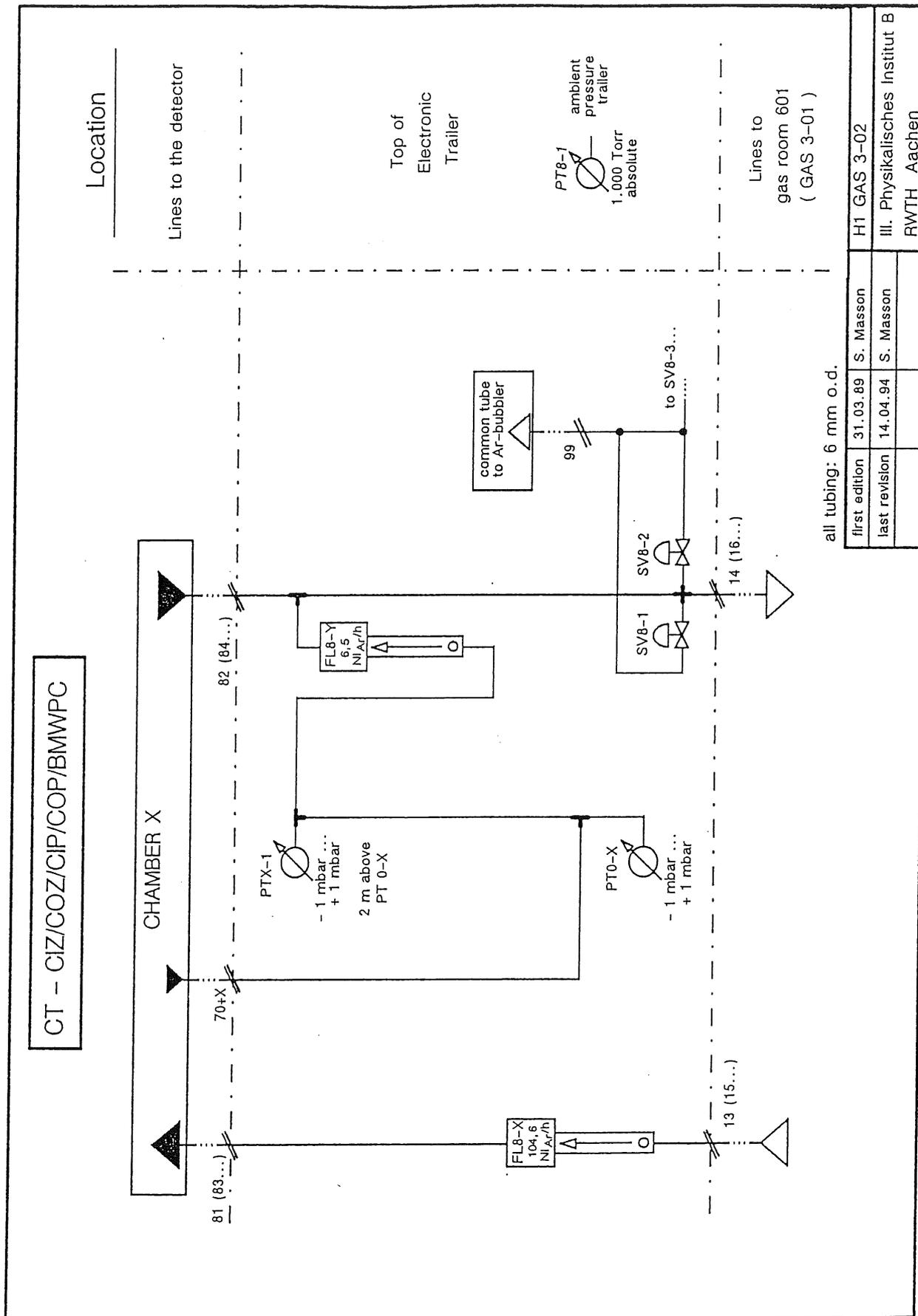
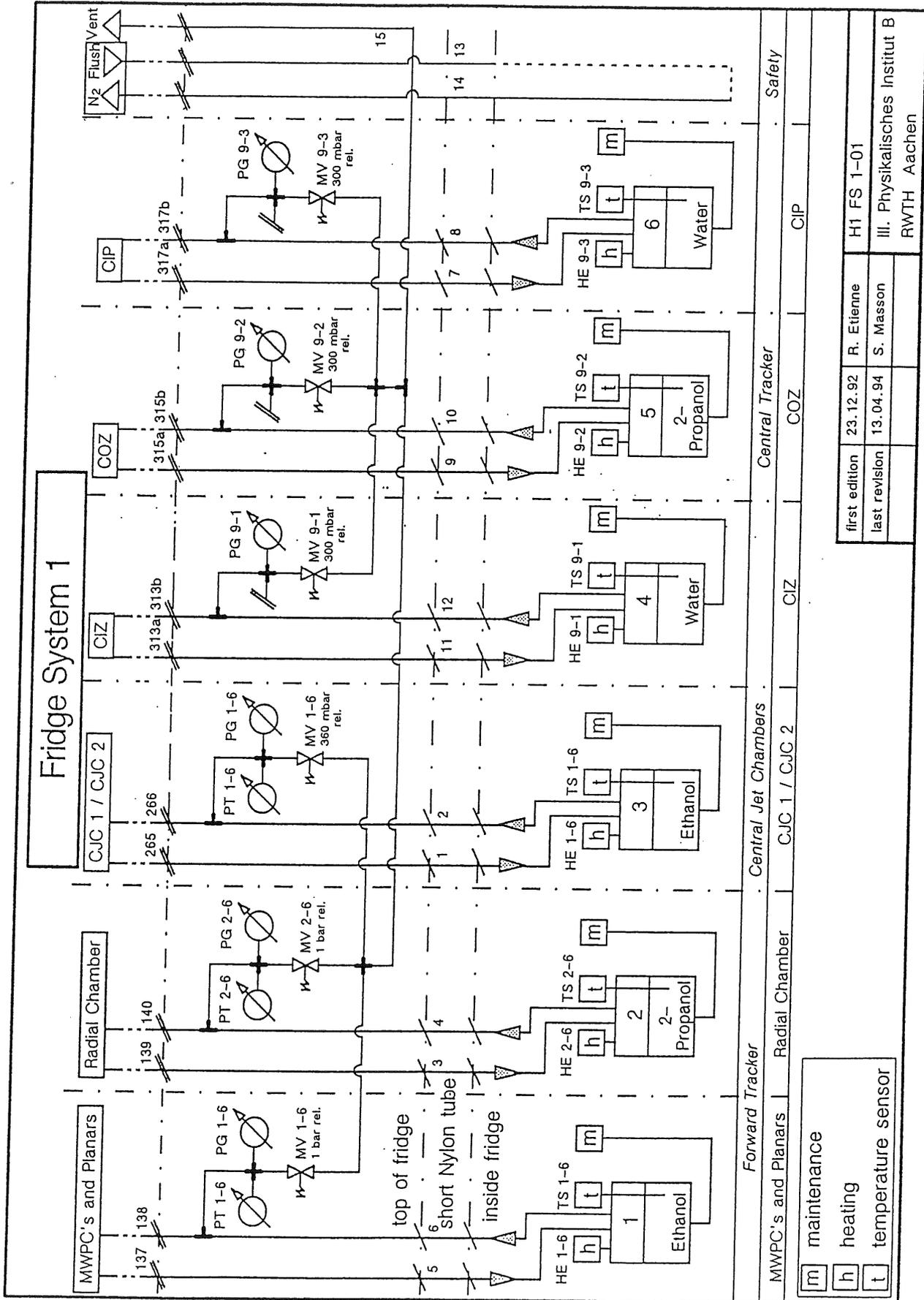


Abb. E14: Gassystem III, Trailerrack, für alle Kreisläufe identischer Aufbau



first edition	23.12.92	R. Etienne	H1 FS 1-01
last revision	13.04.94	S. Masson	III. Physikalisches Institut B RWTH Aachen

Abb. E15: Additivstation, Verrohrungsplan für den Anschluß an die Gassysteme I, II und III

Anhang F: Gase

Substanz	chemische Formel	Molkular- gewicht	Normdichte ¹⁾ ρ_0	dyn. Visko- sität η ²⁾	Temp.-Kor- rektur für η
Name		[g/mol]	[kg/m ³]	[10 ⁻³ Pa·s]	[mPa·s/°C]
Helium	He	4,003	0,17847	0,0196	0,000041
Argon	Ar	39,944	1,7836	0,0222	0,000061
Xenon	Xe	131,3	5,896	--	--
Methan	CH ₄	16,043	0,7168	0,0108	0,000031
Ethan	C ₂ H ₆	30,070	1,3566	0,0092	0,000029
Propan	C ₃ H ₈	44,097	2,00963	0,008	0,000026
Luft	-	28,96	1,2928	0,01812	0,000043
Stickstoff	N ₂	28,016	1,25046	0,01752	0,000039
Sauerstoff	O ₂	32,000	1,42895	0,0203	0,000052
Wasserstoff	H ₂	2,016	0,8987	0,00886	0,000020
Kohlendioxid	CO ₂	44,011	1,9769	0,01463	0,000045
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	46,070	2,043	---	---
Freon12	CF ₂ Cl ₂	120,91	5,510	---	---
Wasser	H ₂ O	18,01	0,768	---	---
2-Propanol	2-C ₃ H ₇ OH	60,097	2,68 ³⁾	---	---

¹⁾ Normdichte bei $T = 273,15 \text{ K}$ ($=0^\circ\text{C}$), $p = 1013,25 \text{ hPa}$, aus [DLA67, HYD83]
²⁾ bei $T = 293,15 \text{ K}$ ($=20^\circ\text{C}$), $p = 1013,25 \text{ hPa}$, aus [FIS79]
³⁾ gerechnet: Molekulargewicht/Molvolumen

Tab. F1: Physikalische Eigenschaften von Gasen

○ häufig verwendete Einheiten:

– Druck: $1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1013,25 \text{ mbar} = 1013,25 \text{ hPa} = 14,696 \text{ psi} = 10332,3 \text{ kp/m}^2$
 – $10,3323 \text{ mH}_2\text{O}$

– Dichte: $1 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ g/l}$;

$$\rho(x) = \rho_0 \cdot \left\{ \left(\frac{273,15 \text{ K}}{T(x)} \right) \cdot \left(\frac{p(x)}{1013,25 \text{ mbar}} \right) \right\} \text{ für id. Gase}$$

– dynamische Viskosität: $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1 \text{ mPa} \cdot \text{s} = 1 \text{ cP}$ (10^{-2} Poise)

○ Sicherheit

Die Regeln und Umgangsformen mit entflammaren Stoffen sind in [BAL81] zusammengefaßt. Spezielle Sicherheitsanweisungen für das DESY-Gelände wurden daraus übernommen (aktuelle Version [SIC93]). In der Tab. F2 sind die Grenzen der Entflammbarkeit für die in den Gasversorgungsanlagen verwendeten brennbaren Komponenten zusammengestellt. Die für jeden Experimentator verpflichtenden Sicherheitsrichtlinien werden für das H1-Experiment in den "H1-Sicherheitsnotizen" aktualisiert herausgegeben.

Gas Name	chemische Formel	Grenze der Entflammbarkeit [%]	
		untere	obere
Methan	CH ₄	5,3	15,0
Ethan	C ₂ H ₆	3,0	12,5
Propan	C ₃ H ₈	2,2	9,5
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	4,3	19,0
2-Propanol	2-C ₃ H ₇ OH	2,9	12,0

Tab. F2: Grenzen der Entflammbarkeit von Gasen und Dämpfen in Luft aus [LEL61]

Abbildungsverzeichnis

2.1:	Die HERA-Speicherringe und Vorbeschleuniger	3
2.2:	Feynman Diagramme für tief inelastische Streuung durch Austausch eines neutralen Stromes (a), eines geladenen Stromes (b) und Diagramm für Photon-Gluon-Fusion (c)	6
2.3:	Schnittbild des H1-Detektors in isometrischer Projektion	9
2.4:	Das innere Spurkammersystem: r-z Projektion und x-y Projektionen	12
3.1:	Querschnitte durch die Zellen der H1-Driftkammern	18
3.2:	Längsschnitte durch die H1-MWPCs	21
3.3:	Teilchenidentifikation mittels Impuls- und Energieverlustmessungen der CJC	25
3.4:	Abhängigkeit der Elektronen-Driftgeschwindigkeit und der Diffusion vom elektrischen Feld; Programm Wircha	26
3.5:	Driftgeschwindigkeit in Argon/Ethan in Abhängigkeit von Zusammensetzung, Druck und elektrischer Feldstärke; Programm Wircha	27
3.6:	In 1992 gemessene Zeitauflösung der H1-MWPCs	29
4.1:	Schematischer Aufbau eines offenen und eines geschlossenen Gaskreislaufes	35
4.2:	Aufteilung der Gasanlagen und Verbindungsleitungen im H1-Gebäude	39
4.3:	Die Racks von Gassystem I (von links): Elektronik, Cir.1, Cir.2, Cir.3/4, Reiniger und Trailer	41
4.4:	Rückansicht von Gassystem I	42
4.5:	Funktionsdiagramm Elektronik und Hauptdatenflüsse für Gassystem I	43
4.6:	Verschaltungsschema Elektronik mit Gassystem-Hardware	45
4.7:	Kontrollausdruck des Programms mit den aktuellen Parallelprozessen; Abfrage von Aachen aus über F58 Terminal Switch, als "user4" in Gassystem I	46
4.8:	Parameter zum Meßwert des Kammerinnendrucks "PT2-1"	48
4.9:	Beispiel der Standard-Graphikanzeige von Gassystem I	49
5.1:	Vorderansicht von Gassystem III, die Schränke von links: Elektronik, Hauptgas-schrank (Cir.1 bis Cir.5), Trailer	55
5.2:	Verschaltung von Massenflußreglern, -messer und Magnetventilen (Gas. III)	56
5.3:	Rückansicht von Gassystem III	56
5.4:	Verrohrungsplan des Einlaßteils für geschlossenen Kreisläufe	58
5.5:	Ausschnitt aus dem Verrohrungsplan eines geschlossenen Kreislaufes	58
5.6:	nach Antoine berechnete Dampfdruckkurven sowie experimentelle Daten für Wasserdampf	61
5.7:	Wasserdampfaddition mit Konzentrationseinstellung durch Flußteilung	65
5.8:	Verrohrungsplan der Additiv-Station	65
5.9:	Station zur Beimischung von Alkohol- und Wasserdampf	66

5.10:	Verhalten der Ethanolkonzentration in den MWPCs und Planaren Driftkammern bei Temperaturerhöhung im Zumischbehälter	67
5.11:	Druck und Temperatur im Behälter 1 der Zumischanlage, Runperiode 1993 .	69
6.1:	Schnittbild der Doppelmembranpumpe und Verschaltung in einem geschlossenen Kreislauf der H1-Gassysteme	81
6.2:	Saugpotentiale der Kreislaufpumpen der größten (CJC) und der kleinsten (CIZ) H1-Spurenkammer im Betriebsjahr 1993	82
6.3:	Temperatur in der H1-Experimentierhalle, Runperiode 1993	83
6.4:	Temperaturverlauf in den Planaren, Runperiode 1993	84
6.5:	Luftdruck in der H1-Experimentierhalle, Runperiode 1993	85
6.6:	Abschätzung des Druckverlustes durch Rohrreibung	87
6.7:	Flußmessung in der Leitung zu und von den F-MWPCs/Planaren (1993) ...	89
6.8:	Schema Drucksensoren "Baratron"	90
6.9:	Schema Druckverhältnisse im H1-Vorwärts-Detektor	93
6.10:	Schema einer idealen Drucksteuerung mit zwei Ventilen	95
6.11:	zeitlicher Druckverlauf in H1-Spurkammern	96
7.1:	Molekularer Aufbau und Grundstruktur eines Molekularsiebs des Typs A ...	100
7.2:	Chromatogramme von ethanolhaltigem Kammergas nach passieren des Kupfer-Katalysators R 3-11, Identifizierung der Nebenprodukte	106
7.3:	Gassystem II (v.l.): Elektronik, Kreisl. 1, 2, Reiniger, Trailer	110
7.4:	Rückansicht Gassystem II (v.l.): Reiniger, Kreisl. 2, 1	110
7.5:	Rohrleitungsplan der Reinigereinheiten von Gassystem II	111
7.6:	In der H1-Runperiode 1993 gemessener Wassergehalt vor und nach den MWPCs und Planaren Kammern	115
7.7:	In der Runperiode 1993 gemessener Wassergehalt des Gases vor und nach den Radialen Driftkammern	117
7.8:	In der Runperiode 1993 gemessener Wassergehalt des Gases aus den zentralen Jetkammern sowie die Temperatur des Wassers in der Zumischanlage	119
8.1:	Bestimmung der Gasdichte aus zwei Differenzdrücken	123
8.2:	Aufbau eines NDIR Meßgerätes	124
8.3:	Aufbau eines Sensors zur Feuchtemessung	125
8.4:	Prinzip der Brennstoffzelle zur Sauerstoffbestimmung	126
8.5:	Prinzip eines Massenspektrometers und Aufbau des Analysators	127
8.6:	Massenspektrogramm von CO ₂ /iso-Butan (80/20) und Luft	127
8.7:	Prinzip eines FTIR und Skizze des Strahlengangs	128
8.8:	Infrarot-Absorptionsspektrum von 2-Propanol	129
8.9:	Prinzip Gaschromatograph und Aufbau des Wärmeleitfähigkeitdetektors ...	130
8.10:	Chromatogramm CO ₂ /i-C ₄ H ₁₀ (80/20) plus Luft	130

8.11: Anschluß der Analysegeräte in geschlossenen Kreisläufen und Verschaltung von Probenumschaltstation und Gaschromatograph	135
8.12: GC-Analysen des Gases aus den Planaren/F-MWPCs	137
8.13: gemessener Propangehalt (NDIR-Gerät, oben) und Druckdifferenz von Kammer- und Kreislaufdruckmesser (unten) des Gases aus den Planaren/F-MWPCs	138
D1: Querschnitt durch ein <i>FMV</i> (links) und ein <i>EMV</i> (rechts)	153
E1: Gas. I, Kreisl. 1, Hauptteil für Vorwärts MWPCs und Planare Driftkammern .	157
E2: Gassystem I, Kreislauf 2, Hauptteil für Vorwärts Radiale Driftkammern	158
E3: Einlaßteil Gassystem I, Kreislauf 1 und 2	159
E4: Reinigerrack für die Kreisläufe 1 und 2 in Gassystem I	160
E5: Hauptteil Gassystem I, Kreislauf 3 für Vorwärts Radiatoren	161
E6: Hauptteil Gassystem I, Kreislauf 4 Reservekreislauf für Vorwärtskammern .	162
E7: Gassystem I, Trailerrack, für alle Kreisläufe gemeinsam	163
E8: Gassystem II, Kreislauf 1, Hauptteil für zentrale Jetkammer 1 CJC1 (und CJC2)	164
E9: Gassystem II, Kreislauf 2, Hauptteil für zentrale Jetkammer 2 CJC2 (und CJC1)	165
E10: Gassystem II, Einlaßteil Kreislauf 1 und 2	166
E11: Gassystem II, Reinigerrack für die Kreisläufe 1 und 2	167
E12: Gassystem II, Trailerrack, für beide Kreisläufe	168
E13: Gassystem III, Hauptteil, für alle Kreisläufe	169
E14: Gassystem III, Trailerrack, für alle Kreisläufe Identischer Aufbau	170
E15: Additivstation, Verrohrungsplan für den Anschluß an die Gassysteme I, II und III	171

Tabellenverzeichnis

2.1: Designparameter der Vorbeschleuniger und des Doppelspeicherrings HERA . . .	4
2.2: Designparameter des Spurkammersystems	13
2.3: Kriterien zum Entwurf der Gasversorgung der inneren H1-Spurkammern	14
3.1: Konstruktionsparameter der H1-Driftkammern	19
3.2: Konstruktionsparameter der inneren H1-MWPCs	22
3.3: minimaler Energieverlust und Anzahl der von einem minimal ionisierenden Teilchen produzierten Elektron-Ionen Paare in H1-Kammerngasen	24
3.4: Gasmischung und Hochspannung der H1-MWPCs in 1992	29
3.5: Driftfeld, Gas und gemessene Ortsauflösung der H1-Driftkammern in 1992 . .	30
4.1: Anforderungen an die Kreisläufe der Gasversorgung	34
4.2: Eigenschaften, Zuordnung und Daten der Gassysteme	37
4.3: Die wichtigsten Regelkreise des Programms zur Steuerung der Gassysteme .	47
5.1: Vergleich der Herstellungs- und Analysengenauigkeit kommerziell erhält- licher Prüfgasgemische	52
5.2: Antoine-Konstanten und zugeschnittene Größengleichung zur Berechnung der Dampfdruckkurven	62
5.3: Temperaturmittelwerte des Behälters 1 der Zumischanlage	70
5.4: Vergleich der Genauigkeit verschiedener Methoden zur Bestimmung des Ethananteils aus den Partialdrücken	74
5.5: gemessener Argongehalt verschiedener nach dem manometrischen Verfah- ren hergestellter Gasproben	75
5.6: Liste der verwendeten Vorgemische, die von [DESB2] für die H1-Tracking- Detektoren hergestellt wurden	76
6.1: Parameter der Verbindungsleitungen von Raum 601 bis zum Detektor	88
6.2: Dichte der Gasmischungen in den H1-Vorwärts-Spurkammern	94
6.3: Parameter Gas, Druck und Fluß im H1-Spurkammersystem (1993)	97
7.1: kritischer Durchmesser ausgewählter Gase und Adsorptionsmöglichkeit in diversen Molekularsieben	102
7.2: Betriebsparameter und Meßergebnisse ausgewählter Reiniger	113
7.3: Zahlen zur Funktion der Molekularsiebe in Gassystem I für die Runperiode 1993	116
8.1: Auswahl geeigneter Meßgeräte zur Gasqualitätsüberwachung	122
8.2: Vergleich der Nachweismöglichkeiten von MS, FTIR und GC	133
8.3: Vergleich von MS, FTIR und GC zur Auswahl des geeigneten Analysegerätes	133
A1: Erklärung der ersten Buchstaben <i>AB</i> in den "logischen Namen"	142
A2: Bedeutung der ersten Zahl <i>X</i> in den logischen Namen	143
A3: Anhang <i>CD</i> zur Charakterisierung der Parameter eines Meßwertes im Pro- gramm	143

B1: Die Kanäle der zwei digitalen Ein-/Ausgabemodule aus dem VME-Einschub	144
B2: Die Kanäle der Analogfilter- und Limitkarte 1 aus der "Distribution Box Level 6"	145
B3: Die Kanäle der Analogfilter- und Limitkarte 2 aus der "Distribution Box Level 6"	146
B4: Die Kanäle der Analogfilter- und Limitkarte 3 aus der "Distribution Box Level 6"	147
B5: Die Kanäle der Analogfilter- und Limitkarte 4 aus der "Distribution Box Level 6"	148
B6: Die Kanäle der Digital-Analog-Wandlerkarte aus dem VME-Einschub	149
C1: Module und Geräte des zentralen VME Crates zur Steuerung eines Gas-systems, Steuerkonsole in Raum 601	150
C2: Module der "Distribution Box Level 6" in Steuerkonsole Raum 601	151
C3: Module der "Distribution Box Trailer" im Trailerrack	151
C4: Weitere Einheiten in den Steuerkonsolen im Raum 601	151
D1: Anschlußbelegung (2 x 12 + 2) des Fluß-Multipositions-Ventils FMV im Pro-benverteiler des Gaschromatographen	152
D2: Anschlußbelegung (1 x 16 + 1) des Einbahn-Multipositions-Ventils EMV im Probenverteiler des Gaschromatographen	153
E1: Zeichenerklärung der verwendeten Schaltsymbole	155
E2: Nummernschema der Verbindungsgasleitungen	156
F1: Physikalische Eigenschaften von Gasen	172
F2: Grenzen der Entflammbarkeit von Gasen und Dämpfen in Luft	173

Literatur- und Herstellerverzeichnis

- [AEE86] Abteilung elektronische Entwicklung (F. Beißel, C. Camps, V. Commichau, K. Hangarter, H. Liebmann, K. Quadflieg, N. Rieb, H. Virnich, T. Wienands), Entwicklung und Herstellung der elektronischen Komponenten für die Gassysteme, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (ab 1986)
- [AGA01] Deutsche L'Air Liquide, Edelgas GmbH, *Gase und Gemische, Armaturen, Gasversorgungsanlagen, Analysegeräte*, Katalog, Bottrop
- [ALC80] W.W.M. Allison and J.H. Cobb, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 30, S. 253 (1980)
- [ALL80] N.J. Allinger et al., *Organische Chemie*, Verlag Walter de Gruyter, Berlin (1980)
- [ATA87] M. Atac, *Wire Chamber Aging and Wire Material*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-34 No.1 (Feb. 1987)
- [BAL01] Balstron Ltd., *Filtergehäuse aus Edelstahl Typ 95 S4 + Filtereinsatz Typ 050-11-BQ*, Maidstone, England, Vertrieb: Fa. Contec GmbH, Bad Honnef; in den H1-Gassystemen sind 12 Filter eingebaut, der Reinigungsgrad beträgt 99,99% für Partikel >0,1 µm Durchmesser
- [BAL81] T. Ball et al., *CERN flammable gas safety manual*, CERN, Genf, Schweiz (1981)
- [BAR90] G.D. Barr et al., *a large-area transition radiation detector*, *Nucl. Instr. Meth.* A294, S. 465-472 (1990)
- [BÄR89] H. Bärwolff et al., *performance of prototypes of the outer z-drift chamber*, *Nucl. Instr. Meth.* A283, S. 467-470 (1989)
- [BAS71] BASF AG, *BASF-Katalysator R 3-11*, Technisches Merkblatt (April 1971)
- [BAY00] Bayer AG, *Bayer Katalysator VP OC 1063*, technisches Merkblatt zum Versuchs-Produkt Palladiumkatalysator (graue, sub-mm dicke Kugeln) Leverkusen
- [BAY89] Bayer AG, private Mitteilung, *Gespräche zur Verwendung neuer Katalysatoren zur Sauerstoffentfernung aus alkoholdampfhaltigen Gasen*, Leverkusen (1989+1992)
- [BEC90] H. Beck, private Mitteilung und: *Konstruktion, Bau und Inbetriebnahme einer computergesteuerten Gasmischanlage*, interne Veröffentlichung DESY H1-03/91-168, Diplomarbeit, Physik-Institut der Universität Zürich (Dez. 1990)
- [BEI69] A. Beiser, *Perspectives of Modern Physics*, Kap. 12, McGraw-Hill (1969)
- [BEI86] F. Beißel, C. Camps, V. Commichau, K. Hangarter, private Mitteilung, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (1886)

- [BEI89] F. Beißel, C. Camps, V. Commichau, K. Hangarter, *The Digital Readout System for the L3 Vertex Chamber*, interner Bericht, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (März 1989)
- [BHR84] D. Baumer, R. Hamm, E. Riedel, *Die wichtigsten Herstellmethoden für Gasgemische*, gwf-gas/erdgas 125, Heft 4, R. Oldenbourg Verlag München, (1984)
- [BINOS] Leybold-Heraeus GmbH, *BINOS IR/UV/VIS*, Firmenschrift 43-000.1 (1985)
- [BOB82] R.F. Bobeck, *Elektrochemische Sensoren für die Sauerstoff-Analyse*, Chemie-Anlagen und Verfahren 1/1982, S. 18-22, 75, 76, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen
- [BOC01] BOC Gase GmbH, *Halbleitergase und Ausrüstung*, Katalog, Stuttgart (1987)
- [BTS01] Firma Merck AG, *BTS KAT NR.18820*, Kupfer-Katalysator, identisch mit BASF-Katalysator R 3-11; in den H1-Gassystemen wurden 10 kg dieses Materials eingesetzt (grüne Tabletten d=1cm, 3mm dick)
- [CAJ01] CAJON Company, '*cajon*' snubber fittings, Macedonia, Ohio, USA (Vertrieb in D.: Fa. B.E.S.T. Köln); Fitting mit Sinterplatte, das den Austritt von Stäuben aus den Reinigerbehältern ([WHI01]) verhindert
- [CAS84] R.J. Cashmore et al., *Exotic Phenomena in High Energy eP Collisions*, Phys. Rep. 122, S. 275-386 (1984)
- [CDF94] CDF Kollaboration, *Evidence for Top Quark Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 1,8 \text{ TeV}$* , Fermilab-Pub-94/116-E (Mai 1994)
- [CHR71] L.G. Christoporou, *Atomic and Molecular Radiation Physics*, Wiley, New York (1971)
- [CHR77] H. R. Christen, *Grundlagen der organischen Chemie*, ©1970, 4. Aufl., Verlage Diesterweg/Sälle Frankfurt und Sauerländer Aarau (1977)
- [CMA89] V. Commichau, S. Masson, *H1 Tracking all Gas Systems, cabling list distribution box trailer*, Dokumentation Verteilerbox für Trailerrack, enthält Verdrahtungsliste und Modulschaltpläne, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (März 1989 / Sept. 1989)
- [CMA92] V. Commichau, S. Masson, *H1 Tracking all Gas Systems, cabling list distribution box level 6*, Dokumentation der Verteilerbox in Raum 601, enthält Verdrahtungsliste und Modulschaltpläne, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (März 1989 / Dez. 1992)
- [COM87] V. Commichau, *Crate Master V02A*, User's Manual, 2. Edition, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (Okt. 1987)
- [COM88] V. Commichau, *Digital I/O VME Module*, User's Manual, 3. Edition, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (Juni 1988)

- [COM89] V. Commichau, *The control computer for the gas system of the H1 FTD, CJC, Central Proportional- and Z-Chambers*, User's Manual, Ill. Phys. Inst. RWTH Aachen (Sept. 1989)
- [COM91] V. Commichau, *VME Spy Memory V01C*, User's Manual, 5. Edition, Ill. Phys. Inst. RWTH Aachen (Sept. 1991)
- [CP900] Chrompak International B.V., *Gaschromatograph der Serie CP9000 GC*, Middelburg, Niederlande
- [DAD92] D. Darvill, E. Deffur, private Mitteilung, *Eichung der Absolutdrucksensoren in den H1-Gassystemen*, DESY (1992)
- [DAN88] M. Danilov et al., *Study of Drift Chamber Ageing with Propane*, DESY 88/090 (1988)
- [DDR92] D. Düllmann, H.B. Dreis, F. Riepenhausen, *Programme zur automatisierten stündlichen Datenaufnahme von den Gassystemen und vom Gaschromatograph*, DESY, Hamburg (1992)
- [DES89] DESY-PR, *Das H1-Experiment*, HERA Bulletin Nr.16, Hamburg (Juli 1989)
- [DESB2] Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Abteilung B2, Gaselager und Mischstation zur Versorgung des internen Bedarfs, Leiter: G. Keßler, DESY Hamburg
- [DIJ88] W.H. Dijkman, *a system for removing both oxygen and nitrogen from a rare gas-hydrocarbon mixture*, NIKHEF-H, Amsterdam, Niederlande, Nucl. Instr. Meth. A274, S. 171-176 (1989)
- [DIJ89] W.H. Dijkman, *priv. Mitteilung*, NIKHEF-H, Amsterdam, Niederlande (1989)
- [DLA67] D'Ans, Lax, *Taschenbuch für Chemiker und Physiker*, Band I, 3.Aufl., Springer Verlag Berlin (1967)
- [DRE91] H.B. Dreis, *Bau einer automatisierten Gaschromatographie-Meßstation für den H1-Detektor*, Diplomarbeit, Ill. Phys. Inst. RWTH Aachen (Sept. 1991)
- [DXM20] Spectramass Ltd., *Massenspektrometer Dataquad DXM200*, Instruction Manual, Congleton Cheshire, England (1987)
- [EC90M] Systech Instruments Ltd., *Oxygen Monitor Model EC90M*, Instruction Manual, Thame Oxfordshire OX9 3BX England (1990)
- [EDWE2] Edwards, Kniese & Co. Hochvakuum GmbH, *Drehschieberpumpe E2M1,5*, Betriebsanleitung 03-371-01-881D, Marburg (Juni 1984)
- [EGL89] S. Egli et al., *the central-inner z-drift chamber of the H1 experiment*, Nucl. Instr. Meth. A283, S. 487-491 (1989)
- [EIW92] F. Eisele, G. Wolf, *Erste Ergebnisse von HERA*, Physikalische Blätter Band 48, S. 786-792 (1992)

- [ETI93] R. Etienne, *Verhalten von Kammergasen in geschlossenen Gaskreisläufen mit Reinigern und Alkoholbeimischungsanlage*, PITHA 93/34, Diplomarbeit, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (Jun. 1993)
- [FEY72] R.P. Feynman, *Photon-Hadron-Interactions*, Benjamin., New York (1972)
- [FIS79] Fischer & Porter GmbH, *Handbuch für die Durchflußberechnung von Dreiflächen-Meßrohren*, BA1-10A9010, Göttingen (1979)
- [FLO91] P. Flower, *Erstellung von Konzepten und Testmessungen zum Aufbau automatischer Additivstationen*, interne Studien, Rutherford & Appleton Laboratory, Didcot, England (1991/92)
- [FPV83] J. Fehlmann, J. Paradiso, G. Viertel, *WIRCHA a program to simulate drift chambers*, ETH Zürich, TEC Detector Group (März 1983)
- [FX800] Epson Deutschland, *Bedienungshandbuch FX800 / FX1000*, Düsseldorf (1986)
- [GAD91] K. Gadow, private Mitteilung, *Abmessungen des H1-Detektors*, DESY, Hamburg (1991)
- [GAR59] G.M. Garibian, *Zh. Eksp. Teor. Fiz und Sov. Phys. JETP* 37, 527 (1959) *JETP* 10, 372 (1960)
- [GGM85] Organ. F. Bonaudi & R.C. Brown, *General Gas Meeting, Gas Systems for Large Experiments*, CERN-EF Division, 13./14. Juni 1985
- [GÖT90] P. Göttlicher, private Mitteilung, *Erfahrungen mit Drehschieberpumpen, die im Gasversorgungssystem für die TEC im L3-Experiment eingesetzt sind*, CERN, Genf, Schweiz (Okt. 1990)
- [GÖT91] P. Göttlicher, *Entwicklung und Bau eines rechnergesteuerten Gassystems für die Spurenkammer des L3-Experiments*, Dissertation, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (Nov. 1991)
- [GRS87] H. Gräßler und W. Struczinski, *Gas systems for the forward- and central region*, DESY H1-TR-202, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (Aug. 1987)
- [H1C01] H1 Kollaboration, *Observation of deep inelastic scattering at low x*, *Physics Letters B* 299, S. 385-393, (1993)
- [H1C02] H1 Kollaboration, *Technical Proposal for the H1-Detektor*, (März 1986)
- [H1C03] H1 Kollaboration, *The H1-Detector at HERA*, DESY 93-103 (Juli 1993)
- [H1C04] H1 Kollaboration, *Technical Progress Report*, (Okt. 1987)
- [HAL87] G. Hallewell et al., *a sonar-based technique for the ratiometric determination of binary gas mixtures*, *Nucl. Instr. Meth.* A264, S. 219-234 (1988)
- [HAN88] K. Hangarter, *Progammentwicklung zur Steuerung der H1 Gassysteme*, *Assembler-Code für Motorola 68000 CPU*, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (1988)

- [HAN92] K. Hangarter, *Program for H1 Gas Systems*, User's Software Manual, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (1992)
- [HES86] D.W. Hess, *Plasma Chemistry in Wire Coating*, aus [LBL86]
- [HIF12] Bronkhorst High Tech B.V., *Benutzer-Handbuch für Modellreihe F100/200*, Ruurlo, Niederlande (1989); in Gassystem III sind 10 Flußregler des Typs F 201 und 5 Flußmesser des Typs F 111 eingebaut
- [HON88] W. Honecker, *Gastests in der SINDRUM-II-Prototypkammer mit Neodym-YAK-Laser*, Diplomarbeit, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (Sept. 1988)
- [HP339] Hewlett-Packard Co., Reporting Integrator 3390 A, Instruction Manual Part No. 03390-91100, Avondale Pennsylvania, USA (©1983)
- [HUK88] M. Huk et al., *Electron Attachment to Oxygen, Water and Methanol in Various Drift Chamber Gas Mixtures*, Nucl. Instr. Meth. A267, S. 107-119 (1988)
- [HYD83] Witzemann GmbH, *HYDRA® Metallschläuche*, Taschenbuch Nr. 301, Metallschlauchfabrik Pforzheim (©1983)
- [INFRA] VEB Junkalor Dessau, *Infralyt 1210*, Bedienungsanweisung, Dessau (1985)
- [ISO01] International Organisation for Standardisation, *Gas analysis - Preparation of calibration gas mixtures - Weighting methods*, Schweiz, ISO 6142 (E) (1981) / Add. 1 (E) (1983)
- [ISO02] International Organisation for Standardisation, *Gas analysis - Preparation of calibration gas mixtures - Manometric methods*, Schweiz, ISO 6146 (E) (1979)
- [ISO03] International Organisation for Standardisation, *Gas analysis - Preparation of calibration gas mixtures - Dynamic volumetric methods*, Schweiz, ISO 6145 (E) Teile 1 bis 6, (1986)
- [ISO04] International Organisation for Standardisation, *Gas analysis - Preparation of calibration gas mixtures - Saturation method*, Schweiz, ISO 6147(E) (1979)
- [JUK87] I. Juricic, J.A. Kadyk, *Anode Wire Aging Measurements and a Search for Remedies*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-34 No.1 (Feb. 1987)
- [KAS88] W. Kast, *Adsorption aus der Gasphase*, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim (1988)
- [KEL61] H. Kelker in *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie*, Band 2/1, S. 129 ff, Verlag Urban & Schwarzenberg, (1961)
- [KEM90] G. Kemmerling, *Untersuchung zur Beimischung von Alkoholdampf in geschlossene Gaskreisläufe für den Betrieb von Drift- und Proportional-kammern*, Diplomarbeit, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (Nov. 1990)

- [KES91] G. Keßler, *Elektronische Durchflußmesser für HERA-Experimente H1 und ZEUS*, DESY B2-91-02, interner Bericht (Juni 1991)
- [KLE87] K. Kleinknecht, *Detektoren für die Teilchenstrahlung*, 2. Auflage, B.G. Teubner Stuttgart (©1987)
- [KNF01] KNF Neuberger GmbH, *Membran-Vakuumpumpen und Kompressoren N 035...*, Datenblatt D 014 für Pumpen des Typs N 035 SV.E, Freiburg-Munzingen (1984); in den H1-Gassystemen sind 4 (+1) Pumpen dieses Typs in "geschlossenen" Kreisläufen eingesetzt
- [KNF02] KNF Neuberger GmbH, *Membran Kompressoren und Vakuumpumpen nach dem Doppelmembransystem N 143 ...*, Datenblatt D 065 für Pumpen des Typs N 143 SV.12E, Freiburg-Munzingen (1985); in den H1-Gassystemen sind 7 (+1) Pumpen dieses Typs in "offenen" Kreisläufen eingesetzt
- [KOH85] F. Kohlrausch, *Praktische Physik*, 23. Auflage, Band I, S. 398 ff, BG Teubner (1985)
- [KOL92] S. Kolya, *H1 drift chamber data acquisition system*, DESY (Okt. 1992)
- [KOR41] S.A. Korff, M.E. Rose, *An Investigation of the Properties of Proportional Counters*, Phys. Rev. 60, S. 850f (1941)
- [KOR46] S.A. Korff, *Electrons and Nuclear Counters*, Van Nostrand, New York (1946)
- [KOS89] B. Kosel, *Programme zur graphischen Darstellung auf einem RGB-Monitor*, Ill. Phys. Inst. RWTH Aachen (1889)
- [KRA90] B. Krause, private Mitteilung, *Erfahrungen mit Drehschieberpumpen, die im Gasversorgungssystem für die Driftkammern DC1 und DC2 im Sindrum-II Spektrometer eingesetzt sind*, PSI (Paul Scherrer Institut), Villingen, Schweiz (Sept. 1990)
- [KRM87] B. Krause, S. Masson, *Untersuchung der Signalform, Driftgeschwindigkeit, Diffusion und Ortsauflösung in verschiedenen Gasgemischen*, PITHA 87/06, Ill. Phys. Inst. RWTH Aachen (April 1987)
- [LBL86] J. Kadyk (Organisator), *Proceedings of the Workshop on Radiation Damage to Wire Chambers*, LBL-21170 (Jan. 1986)
- [LBÖ60] Landolt-Börnstein, *Gleichgewichte Dampf-Kondensat und osmotische Phänomene*, II. Band, 2. Teil, Springer Verlag (1960)
- [LEL61] B. Lewis, G. von Elbe, *Combustion, flames and explosions of gases*, 2nd Edition Academic Press Inc., New York/London (1961)
- [LIE20] Liebherr Hausgeräte GmbH, *No-Frost Gefrierschrank Modell GSN 2005*, Gebrauchsanleitung 78081015, Ochsenhausen (Feb. 1992)
- [LIN01] Linde Kryotechnik Ag, Werksgruppe Verfahrenstechnik und Anlagenbau, *Die HERA-Kälteanlage*, 2. Auflage, Hamburg/Pfungen (Nov. 1993)

- [LIN02] Linde Ag, Werksgruppe technische Gase, *Gaskatalog für Forschung, Entwicklung und Meßtechnik*, Höllriegelskreuth b. München
- [LIN03] Linde Ag, Werksgruppe technische Gase, *Katalog Sondergase*, Höllriegelskreuth b. München (1987)
- [LIN04] Linde Ag, *Analysenzertifikat für Leihflasche Nr.: K-76-67-120*, Werksgruppe technische Gase, Düsseldorf (1989)
- [LOH83] E. Lohrmann, *Remarks on the Kinematics of e-p Collisions in HERA*, HERA 83/08, DESY, Hamburg (1983)
- [M3A5A] Fa. Merck, *Union Carbide Molekular sieve 3A® / 5A®*, in den H1-Gassystemen wurden 8 kg / 3 kg diese Materials eingesetzt (mm-große Stabpresslinge (3A), Kugeln (5A))
- [MAFLR] Hersteller von Massenflußreglern:
Bronkhorst High Tech B.V., AK Ruurlo Niederlande
MKS Instruments Deutschland, München
Platon Flowbits GmbH, Neckargemünd
- [MAG01] S. Masson, *H1-Tracking Gas Systems, Mechanic Parts 1, 2 and 3*, internes Papier, III. Phys. Inst. RWTH Aachen, enthält u. a. aktualisierte Verrohungspläne, letzte Version April 1994
- [MAG02] S. Masson, *H1-Tracking All Gas Systems, all systems special*, internes Papier, III. Phys. Inst. RWTH Aachen, laufend aktualisiert, letzte Version von April 1994
- [MAL36] L. Malter, *Phys. Rev.* 50, S. 48 (1936)
- [MEC88] Mechanische Werkstatt (E. Bock, K-D. Boffin, J. Lijster, D. Jahn und Azubis), *Herstellung und Aufbau der mechanischen Komponenten für die Gassysteme*, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (ab 1988)
- [MER91] Martin Merkel GmbH & Co. KG, *Antworten zur Beständigkeit von Elastomer-Werkstoffen*, Hamburg-Wilhelmsburg (©1991)
- [MGR01] Messer Griesheim GmbH, *Gase hoher Reinheit*, 2. Auflage, Druckschrift, Düsseldorf 90.0022
- [MGR85] Messer Griesheim GmbH, *Gasreinigungssysteme*, Katalog der Abteilung Sondergase, Düsseldorf (1985)
- [MICOM] Desy, *MICOM Desynet*, H1 Terminal Switch, DESY Hamburg
- [MK122] MKS Instruments, Inc., *MKS Baratron Type 122A*, Instruction Manual, Andover, Massachusetts 01810, USA (Aug. 1989); pro Gassystem ist ein Absolutdruckmesser mit dem Meßbereich 0...1000 Torr eingebaut
- [MK223] MKS Instruments, Inc., *MKS Baratron Type 223B Pressure Transducer*, Instruction Manual, Andover, Massachusetts 01810, USA (April 1987); in den Gassystemen sind insgesamt 25 Stück (21 St. Meßbereich ± 100 Pa, 4 St. Meßbereich ± 1 kPa) eingebaut

- [MKBAR] MKS Instruments, Inc., *Druckmeßgeräte MKS Baratron Serie 100/200*, Firmenschrift der Firma MKS Instruments Deutschland, München (1988)
- [MPV90] Burr-Brown Corporation, *MPV904*, User's Manual 2. Edition, Tucson, Arizona, USA (1985)
- [MULTI] NEC Deutschland GmbH, *Color Monitor Multisync II*, User's Manual, München (1986)
- [MÜL92] K. Müller et al., *construction and performance of a thin cylindrical multiwire proportional chamber with cathode pad readout for the H1-experiment*, Nucl. Instr. Meth. A312, S. 457-466. (1992)
- [NIC89] Nicolet Instruments GmbH, aus den Unterlagen zum Anwenderseminar: *Fourier-Transformation Infrarot-Spektroskopie*, Applikationszentrum Offenbach (März 1989)
- [NUPCA] Nupro Company, Swagelok®-Gruppe, *NUPRO® Einstellbare Rückschlagventile, Serie CA*, Datenblatt N-189-4-G, Willoughby, Ohio, USA (©1989); in den Gassystemen sind 38 Stück des Typs B6/B10-CA-MM-3 eingebaut; der Öffnungsdruck kann zwischen 3 und 50 psi (-20 bis -350 kPa) eingestellt werden
- [OXANA] K. Gerhard Industrie-Elektronik, *OXANAL Sauerstoffspurenmeßgerät*, Betriebsanleitung, Blankenbach
- [OXYNO] Leybold AG, *OXYNOS 100 μ p-Sauerstoffanalysator*, Datenblatt 43.520.01, Hanau (1989)
- [PAN3A] Panametrics GmbH, *System 3A Hygrometer*, Handbuch, Version 1/89 RS, Hofheim/Wallau (1989)
- [PAN-5] Panametrics Ltd., *System 5 Hygrometer*, Operator's Manual, Shannon, Irland (1986)
- [PAN-F] Panametrics GmbH, *Sauerstoff-Analysatoren Delta-F Verfahren*, Produktbeschreibung 01-5/88, Hofheim/Wallau (1988)
- [PAN-M] Panametrics GmbH, *M Serie Aluminiumoxid-Feuchtesensor für Gase und Flüssigkeiten*, Beschreibung F12-11/88, Hofheim/Wallau (1988)
- [PDG92] Particle Data Group, Part II, *Review of Particle Properties*, Phys. Rev. D, Vol.45, No.11 (1992)
- [PEI84] A. Peisert, F. Sauli, *Drift and Diffusion of Electrons in Gases: a Compilation*, CERN 84-08, Experimental Physics Division, Genf, Schweiz (Juli 1984)
- [PIL93] W. Pilgram, *Elektronenidentifikation mittels Übergangsstrahlung im H1-Detektor*, PITHA 93/22, Dissertation, Ill. Phys. Inst. RWTH Aachen (April 1993)
- [PORF1] Porter Instrument Company, *Durchflußmesser Modell F65 und Modell F150*, Firmenschrift der Vertriebsfirma "WSM Präzisionsarmaturen GmbH", Eching (1987); in den H1-Gassystemen sind 93 Stück des Modells F150 mit verschiedenen Meßrohren und Schwebekörpern eingebaut

- [POT89] J. Pothier, *BBL3 (Black Box L3)*, CERN EF/L3, pub. no. 26-4-89, CERN, Genf, Schweiz (April 1989)
- [QVT20] Qume, *QVT202, User's Manual part No. 35083-10*, San Jose, Kalifornien, USA (1985)
- [RIN91] U. Rinsche, *Entwicklung des Betriebssystems zum Steuerprogramm des Gassystems*, Diplomarbeit, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (April 1991); vergl. auch Rechnersteuerung des Gassystems für die L3-Spurenkammer
- [ROB65] J. Roboz in *Trace Analysis, Physical Methods*, Interscience Publishers, John Wiley & Sons Inc., S. 435 ff (1965)
- [RPS77] R.C. Reid, J.M. Prausnitz, T.K. Sherwood, *The Properties of Gases and Liquids*, 3. Auflage, McGraw-Hill (1977)
- [SAU77] F. Sauli, *Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers*, CERN 77-09, Genf, Schweiz (1977)
- [SCH90] P. Schmüser, *Zur Fertigstellung von HERA*, Physikalische Blätter, Band 46 Nr. 12, S. 470-474 (1990)
- [SI910] Zellweger Uster GmbH, *Sieger Gasalarm, Fernsensor Typ 910 und Anlage Modell 5700*, Firmenschrift aus dem Produktionsbereich Sieger, München (1987)
- [SIC82] DESY-Sicherheitsgruppe, *Sicherheitsvorschriften für brennbare Gase im Experimentierbereich*, DESY, Hamburg (Nov. 1982)
- [SIC85] DESY-Sicherheitsgruppe, *Sicherheitsregeln für HERA-Experimente*, DESY, Hamburg (Juli 1985)
- [SIC93] DESY-Sicherheitsgruppe, *DESY - Sicherheitsvorschriften für den Umgang mit Gasen*, interner Bericht DESY D5-93-01, Hamburg (Jan. 1993)
- [STR86] W. Struczinski, *Identifizierung hochenergetischer Teilchen durch Übergangsstrahlung*, Habilitationsschrift, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (Juli 1986)
- [STR94] W. Struczinski, private Mitteilung, *Überprüfung der Nullpunktsdrift der Differenzdruckmesser für den Kammerinnendruck*, DESY, Hamburg (1994)
- [SUP89] Supelco Inc., *Wie man ein GC System vor einer Kontamination mit Wasser schützt*, Der Supelco Reporter Vol.8, Nr.6 (©1989)
- [SVA92] S. Svanberg, *Atomic and Molekular Spectroscopy*, 2. Auflage, S. 112 ff, Springer-Verlag (1992)
- [THO84] K. Thomas, *Aufbau und Erprobung einer akustischen Meßmethode für die Dichte von Gasgemischen*, Diplomarbeit, III. Phys. Inst. RWTH Aachen (Juli 1984)
- [ULT93] Herr Ulte, private Mitteilung, *Gespräch zu Querempfindlichkeiten der Aluminiumoxid-Feuchtesensoren [PAN-M]*, Fa. Panametrics, Hofheim (1993)

- [VAR37] Varian Associates, Inc., *Series 3700 Gaschromatograph*, Operating and Maintenance Manual, Pub. No. 85-001139-00, Walnut Creek, California, USA (Dez. 1979)
- [VAV86] J. Va'vra, *Review of Wire chamber Aging*, aus [LBL86]
- [VAV90] J. Va'vra, *Aging of Gaseous Detectors*, SLAC-Pub-5207 (1990)
- [VDW01] VEB GRW Teltow, *Elektronischer Druckwandler DW0..., DW1... und DW4...*, Bedienungsanleitung, Teltow (© Dez. 1986); in den Gassystemen sind 22 Relativdruckmesser des Meßbereichs 100 kPa und 12 Stück des Meßber. 40 kPa eingebaut
- [VGPM5] PEP Modular Computers, *Graphic Processor Module for VME bus*, User's Manual Doc. No. 507-0-UM-0404, Kaufbeuren (1985)
- [VICI1] VICI AG, Valco Europe, *General Catalog*, Schenkon, Schweiz (1990); vier verschiedene Mehrfachanschluß-Multipositions-Ventile für den Gaschromatographen und die Probenumschaltung, inklusive Aktuatoren und Steuerhardware.
- [VME48] BICC-Vero Inc., *VME48200 Quad Serial Port Board*, User's Manual part No. 454-48204F Rev. D. 0, Trumbull USA (1986)
- [WHI01] WHITEY Co., *Probenentnahmezylinder aus Edelstahl 3046*, Highland Height, Ohio, USA; Vertrieb: Fa. B.E.S.T. Köln; in den Gassystemen sind insgesamt 10 dieser Behälter mit einem Volumen von 3785 ccm (=1 Gal_{am.}) als Behälter für die Reinigermaterialien ([M3A5A, BTS01]) eingesetzt
- [WIR00] H. Wirth in: *Ullmanns Enkyclopädie der technischen Chemie; Adsorption*, Band 2, Verfahrenstechnik I, Verlag Chemie Weinheim
- [WIR89] H. P. Wirth, *Analyse von Driftkammergasen mit einem Massenspektrometer*, Diplomarbeit, Ill. Phys. Inst. RWTH Aachen (März 1989)
- [WOL86] G. Wolf, *HERA: Physics, Machine and Experiments*, DESY 86-089, Hamburg (Aug. 1986)
- [XVME1] XYCOM, *XVME102 DRAM Module*, User's Manual part No. 74102, Saline, Michigan, USA (1988)
- [XVME4] XYCOM, *XVME400/401 Quad serial I/O Modules*, User's Manual part No. 74400, Saline, Michigan, USA (1988)
- [XVME5] XYCOM, *XVME560 Analog Input Module*, User's Manual part No. 74560, Saline, Michigan, USA (1984)
- [ZIM89] W. Zimmermann et al., *A 16 channel VME Flash ADC system F1001-FADC*, DESY, H1 interner Bericht (Feb. 1989); dieser Typ FADC (Tackfrequenz 104 MHz) ist Standard in der kompletten H1-Auslese, Hersteller: Fa. Struck, Hamburg/Tangstedt

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Siegfried Masson
Geburtsdatum	24. Februar 1957
Geburtsort	Unkel am Rhein
Eltern	Erich und Irmgard Masson geb. Culino
Familienstand	verheiratet, drei Kinder

Ausbildungsdaten

1963 – 1967	katholische Volksschule Unkel
1967 – 1976	staatl. Sankt Martinus Gymnasium Linz, 6'76 Abitur
1976 – 1979	Studium Elektrotechnik an der RWTH Aachen, 11'82 Vordiplom A
1979 – 1988	Studium Physik an der RWTH Aachen, 5'83 Vordiplom; 1'85 – 6'87 Diplomarbeit am III. Physikalischen Institut der RWTH Aachen: Untersuchung der Signalform, Driftgeschwindigkeit und Diffusion in verschiedenen Gasgemischen; 2'88 Diplom, Wahlfächer: Technische Akustik und Ultraschall, Hochenergiephysik
1988 – 1994	Promotion am III. Physikalischen Institut der RWTH Aachen: Entwicklung, Bau und Betrieb universeller Anlagen zur Gasversorgung für das innere Spurkammersystem des H1-Detektors; 24.10.1994 Tag der mündlichen Prüfung

Beschäftigungen

1976 – 1977	16 Wochen Industriepraktikum bei der Firma H. Moeller AG, Bonn: Grundausbildung in Mechanik und Elektrotechnik
1977 – 1980	stud. Hilfskraft am Klinikum der RWTH Aachen: Abteilungen Kardiologie- und Radiologie-Intensiv
1980 – 1983	stud. Hilfskraft am Institut für Verfahrenstechnik der RWTH Aachen: Weiterentwicklung und Betrieb von Anlagen zur Pervaporation
1985 – 1987	stud. Hilfskraft am III. Physikalischen Institut der RWTH Aachen: Aufbau und Test von Prototyp-Detektoren und Gassystemen
1988 – 1994	wiss. Angestellter am III. Physikalischen Institut der RWTH Aachen: Entwicklung, Bau und Betrieb von automatischen Gassystemen sowie Konstruktion und Einbau von selbsttragenden Radiatoren für das H1-Experiment

Danksagung

An Planung und praktischer Realisation der Gasversorgungsanlagen waren zahlreiche Mitarbeiter der RWTH Aachen, der Universität Zürich sowie der Forschungszentren RAL und DESY beteiligt. Ein herzliches Dankeschön möchte ich an alle Damen und Herren richten, die direkt oder indirekt zum Gelingen der Projekte beigetragen haben.

Namentlich bedanken möchte ich mich bei meinem Referenten und Institutsleiter Universitätsprofessor Dr. G. Flügge, der mir die Promotion in seinem Haus ermöglichte und mir bei der Durchführung der Projekte weitgehend freie Hand ließ. Herr Privatdozent Dr. W. Struczinski hat alle Phasen meiner Arbeit mit fundiertem Hintergrundwissen begleitet. Als angenehmer Diskussionspartner hatte er auch an der kritischen Durchsicht meiner Dissertation maßgeblichen Anteil. Ebenso stand mir Herr Dr. H. Gräßler mit seinem qualifizierten Arbeitseinsatz und vielen wertvollen Ratschlägen zur Seite.

Die leistungsfähige und betriebssichere Elektronikausstattung der Gasanlagen habe ich den Herren Dr. V. Commichau, F. Beißel und weiteren Mitarbeitern der elektronischen Abteilung [AEE86] zu verdanken. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dr. K. Hangarter bedanken, der die bedienerfreundliche und zuverlässige Software zur Anlagensteuerung erstellte. Die komplexen mechanischen Aufbauten und Installationen wurden unter Leitung der stets hilfsbereiten Herren E. Bock und K. Boffin von der mechanischen Werkstatt des Institutes [MEC88] sowie an der Universität Zürich durchgeführt.

Für den Erfolg der Gasversorgungsanlagen war die Arbeit der Diplomanden H. B. Dreis, M. Hohlmann, G. Kemmerling und R. Etienne von großem Nutzen. Sie haben wesentlich am Aufbau und Test der Gassysteme, der Gasqualitätsanalytik sowie an der Entwicklung neuer Reinigungsverfahren mitgearbeitet.

Ganz herzlich danke ich meiner Frau und meinen Kindern, die in den letzten Jahren großes Verständnis für mich aufgebracht haben.

Vielen Anfragen von Physikern und Technikern ist es zu verdanken, daß wichtige Probleme bei Gasversorgungsanlagen in allgemeiner Form in der vorliegenden Arbeit dargestellt sind. Ebenso möchte ich allen hier nicht namentlich erwähnten Beteiligten versichern, daß ich ihre Unterstützung nicht vergesse.

Zur Durchführung der vorliegenden Arbeit wurden Mittel vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) zur Verfügung gestellt.

Vielen Dank

Siegfried Masson