

**Konstruktion, Bau und Inbetriebnahme
einer
computergesteuerten
Gasmischanlage**

Diplomarbeit von
Hanspeter Beck

ausgeführt unter der Leitung von
Prof. Dr. P. Truöl

Dezember 1990

Physik-Institut der Universität Zürich

**Konstruktion, Bau und Inbetriebnahme
einer
computergesteuerten
Gasmischanlage**

Diplomarbeit von
Hanspeter Beck

ausgeführt unter der Leitung von
Prof. Dr. P. Truöl

Dezember 1990

Physik-Institut der Universität Zürich

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	4
1. Die Gasmischanlage	4
1.1 Anforderungsprofil	4
1.2 Schwebekörperflussmesser	6
1.3 Elektronische Massenflussmesser	8
1.4 Der Durchflusswascher	11
1.5 Gesamtkonzept	16
1.6 Probleme	17
2. Computersteuerung des Gassystems	26
2.1 Analog/Digital-Wandler	26
2.2 Vervielfacher	26
2.3 Digitaler Schalter	27
2.4 Computerprogramme zur Ansteuerung des A/D-Wandlers	27
3. Das Gassteuerungsprogramm	29
3.1 Anforderungen an das Programm	29
3.2 Starten des Programms	29
3.3 Übersicht über den Programmablauf	31
3.4 Konfiguration der Gaskanäle	32
3.5 Konfiguration des Durchflusswaschers	33
3.6 Konfiguration der Gasmischung	35
3.7 Der Gesamtfluss	35
3.8 Eichen der Massenflussregler	36
3.9 Speichern der Gasparameter	39
3.10 Starten des Flusses	39
3.11 Stoppen des Flusses	40
3.12 Verlassen des Programms	40

4. Experimenteller Teil	41
4.1 Messidee	41
4.2 Versuchsaufbau	41
4.3 Funktionsweise einer Vieldrahtproportionalkammer	45
4.4 Messresultate	51
5. Schlussbemerkung	59
Anhang	60
A1 Das Computerprogramm	61
A2 Die Ruthenium-Quelle	64
A3 Eichprotokolle der elektronischen Massenflussregler	65
Literaturverzeichnis	69
Verdankung	70

Zusammenfassung

In der Teilchenphysik werden mit Gas gefüllte Detektoren benutzt, um ionisierende Strahlung zu messen. Das Gas, das dabei verwendet wird, muss ganz bestimmten Anforderungen gehorchen. Ziel dieser Arbeit war es, eine computer-gesteuerte Gasmischanlage für Gasdetektoren zu bauen und in einem Test-experiment zu erproben.

Im ersten Kapitel wird die Gasmischanlage beschrieben; d.h. es wird dargestellt wie ein Gasfluss gemessen und wie eine Mischanlage ausgelegt werden kann. Im zweiten Kapitel wird die Computersteuerung beschrieben.

Das eigentliche Programm ist im dritten Kapitel dargestellt.

Das vierte Kapitel schliesslich behandelt den Versuchsaufbau, die Funktionsweise einer Proportionalkammer und die Messresultate an dieser Kammer.

Abstract

In particle physics gas filled detectors are used to measure ionizing radiation. The gas used has to meet several requirements. In the course of the work described here, a computer controlled gasmixing system was built and tested. Chapter one describes the gassystem, how the gas flow is measured and how it was designed.

Chapter two describes, how the computer communicates with the control units. The programs, which steer the gas mixing, will be described in chapter three. Finally, the test of the complete system with a multiwire proportional chamber is described in chapter four.

Einleitung

In den letzten 20 Jahren sind in der Teilchenphysik Vieldrahtproportional- und Driftkammern als Teilchendetektoren entwickelt und verwendet worden. Solche Detektoren haben ein sehr gutes Orts- und Zeitauflösungsvermögen, welches aber von einer Vielzahl von Parametern abhängt. Ein wichtiger Parameter ist nicht zuletzt die geeignete Wahl der Gasmischung, die während der gesamten Messzeit, über Wochen und Monate möglichst exakt beibehalten werden muss.

Bis anhin verwendete man zur Bestimmung des Gasflusses Schwebekörperflussmesser, die den Nachteil haben, dass sie nur eine relativ grobe Bestimmung des Gasflusses zulassen. Schwebekörperflussmesser sind zudem empfindlich auf Temperaturschwankungen, die sich im Tag-Nacht-Rhythmus, in den Jahreszeiten und im Wetter bemerkbar machen.

Ziel dieser Arbeit war, eine Gasmischanlage zu bauen, bei der ein Computer den Gasfluss misst und regelt, unabhängig von äusseren Umweltparametern.

1. Die Gasmischanlage

1.1 Anforderungsprofil

Violdrahtkammern messen die Ionisationslawine, die ein elektromagnetisch wechselwirkendes Teilchen beim Durchgang durch das Gas erzeugt. Die Form dieser Lawine hängt dabei empfindlich von der Wahl der Gasmischung ab. In Edelgasen werden die grössten Lawinen erzeugt. Mit einem organischen Gas (Ethan, Methan, Isobutan...) als Beimischung kann die Ausbreitung dieser Lawine über das ganze Gasvolumen verhindert werden. Es ist also möglich, nicht nur den Zeitpunkt sondern auch den Ort der Primärionisation zu bestimmen. Wird elektronegatives Gas (z.B. 0.2% Freon) hinzugefügt, können einzelne Elektronen, welche z.B. durch Photoeffekt entstehen, weggeschluckt werden. Ein Lösungsmittel schliesslich verhindert, dass in der Kammer Ablagerungen ent-

stehen, was eine lange Lebensdauer der Vieldrahtkammer gewährleistet. Mit der Wahl der Gasmischung kann also die Orts-, Zeit- oder Energieauflösung für eine gegebene Vieldrahtkammer optimiert werden. Eine Gasmischanlage für Vieldrahtkammern muss daher in der Lage sein, ein möglichst grosses Spektrum von Gasen mischen zu können. Die Gasmischanlage die hier gebaut wurde, kann bis zu vier verschiedene Gase unabhängig voneinander regeln und zu einem Gasgemisch vereinen. Weiter besteht die Möglichkeit, einen Teil des Gases durch eine Flüssigkeit (meist Methylal $\text{H}_3\text{CO}-\text{CH}_2-\text{OCH}_3$ oder Wasser H_2O) zu leiten und mit dem Dampf dieser Flüssigkeit in festem Verhältnis zu versetzen. Da zusätzlich die Leckrate der Vieldrahtkammer gemessen werden soll, wird das Gasgemisch, nachdem es durch die Kammer geflossen ist, wieder zurück in die Gasmischanlage geleitet, wo der Fluss des zurückfliessenden Gases gemessen wird. Die Differenz dieser beiden Gasflüsse ergibt die Leckrate der Kammer.

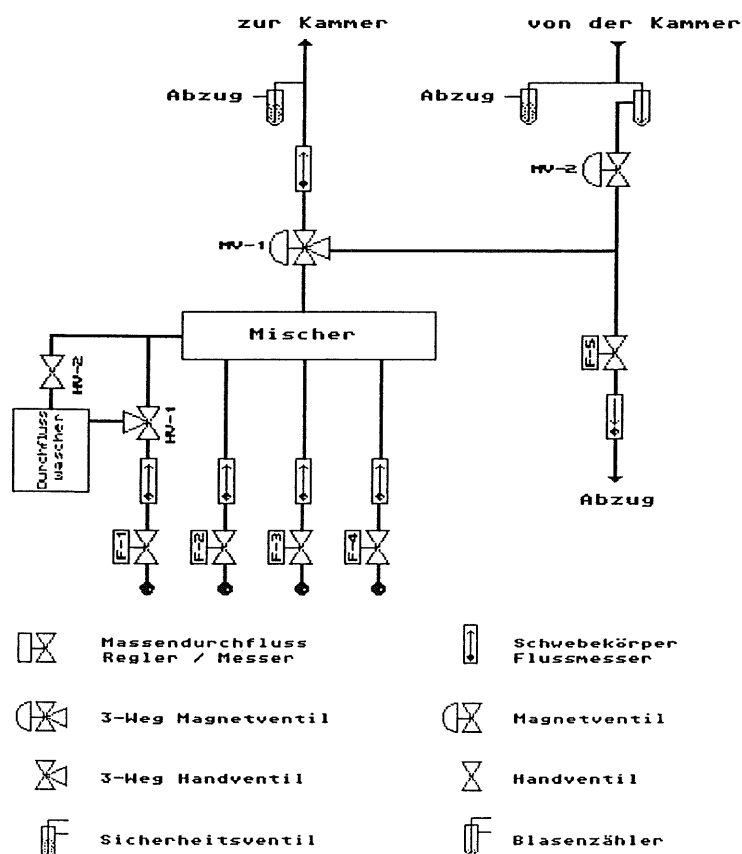


Fig.1 Schema des Gassystems

Fig.1 zeigt, wie die gestellten Anforderungen verwirklicht wurden. In unserem System sind alle Leitungen aus Kupferrohr gefertigt ($\Phi=6$ mm), wobei die Übergänge zu den Ventilen etc. mit Standard Fassungen (System Swagelock) realisiert wurden.

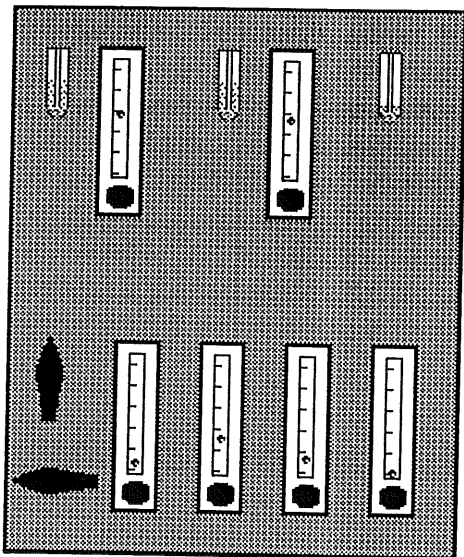


Fig.2 Frontplatte

Anhand des Blasenzählers ist erkennbar, ob überhaupt Gas von der Kammer zurückfließt.

Im folgenden soll die Funktionsweise der einzelnen Komponenten der Gasmischanlage erläutert werden.

1.2 Schwebekörperflussmesser

Ein Schwebekörperflussmesser besteht aus einem senkrecht stehenden konischem Rohr mit einem Schwebekörper darin, hier eine Kugel. Fließt nun ein viskoses Medium durch dieses Rohr, so wird sich die Kugel infolge der Reibung heben. Eine grobe Abschätzung, in der die Reibung des Gases am Rohr vernachlässigt wird, verdeutlicht diesen Zusammenhang.

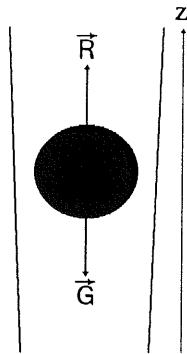


Fig.3

Für die Kugel soll Stoke'sche Reibung gelten:

$$\vec{R} = 6\pi\eta r\vec{v} \quad (1.2.1)$$

mit η : Viskosität des Gases

r : Radius der Kugel

\vec{v} : Geschwindigkeit des Gases relativ zur Kugel

Dagegen wirkt das Gewicht der Kugel:

$$\vec{G} = m\vec{g} \quad (1.2.2)$$

mit m : Masse der Kugel

\vec{g} : Erdbeschleunigung

Der Gasfluss durch das Rohr ist die Menge Gas (Volumen), die pro Zeiteinheit durch einen gedachten Querschnitt strömt.

$$\Phi = \frac{dV}{dt} \quad \begin{array}{l} \Phi: \text{Gasfluss} \\ V: \text{Gasvolumen} \end{array} \quad (1.2.3)$$

Da das Gas durch ein Rohr mit Querschnitt Q fließt, gilt:

$$dV = Qdz + zdQ \quad (1.2.4)$$

Falls sich der Querschnitt Q linear in z ändert, gilt:

$$Q(z) = Q_0 + \alpha z \quad (1.2.5)$$

$$dQ = \alpha dz \quad (1.2.6)$$

dz lässt sich durch die Geschwindigkeit ausdrücken:

$$dz = v dt \quad (1.2.7)$$

Somit erhalten wir für den Gasfluss:

$$\Phi = \alpha v z + Qv \quad (1.2.8)$$

Die Geschwindigkeit wird somit unter Verwendung von (1.2.8) und (1.2.5):

$$v = \frac{\Phi}{Q_0 + 2\alpha z} \quad (1.2.9)$$

Setzt man diese Geschwindigkeit in die Formel für die Stoke'sche Reibung (1.2.1) ein und wird Gleichgewicht mit der Gewichtskraft (1.2.2) verlangt, gilt:

$$6\pi\eta r \frac{\Phi}{Q_0 + 2\alpha z} = mg \quad (1.2.10)$$

Die Steighöhe der Kugel ist somit:

$$z = \frac{3\pi\eta r}{\alpha mg} \Phi - \frac{Q_0}{2\alpha} \quad (1.2.11)$$

Die Steighöhe hängt linear mit dem Gasfluss zusammen. Die Viskosität η ist gasabhängig und temperaturempfindlich. Für kleine Flüsse wird die Steighöhe z negativ, das bedeutet, dass dort die Kugel noch nicht zu schweben vermag, es ist unmöglich so kleine Flüsse zu messen.

1.3 Elektronische Massenflussregler

Die von uns verwendeten, elektronischen Massenflussmesser¹⁾ funktionieren nach dem Prinzip des Wärmetransports [1], wobei die Differenztemperatur ΔT in einem beheizten Teilstück eines Kapillarrohres gemessen wird. Die Kapillare wird nur von einem Teilstrom durchflossen, während der Rest durch einen Bypass mit einem Messbereichseinsatz strömt. Der Messbereichseinsatz besteht aus einem Stapel runder Scheiben von 200 μm Dicke, in die winzige Kanäle eingätzt sind. Die Scheiben sind so angefertigt, dass die Durchflussbedingungen in der Kapillare und im Bypass gleich sind. Damit sind Haupt- und Nebenfluss zueinander proportional. Es genügt also den Fluss in der Kapillare zu bestimmen (s.Fig.4).

1) Bronkhorst HIGH TECH B.V
Nijverheidsstraat 1A - 7261 AK Ruurlo
Typ F-201C-FA

Vertreten in der Schweiz durch:
Vögtlin Instruments AG
Langenhagstrasse 1
4147 Aesch

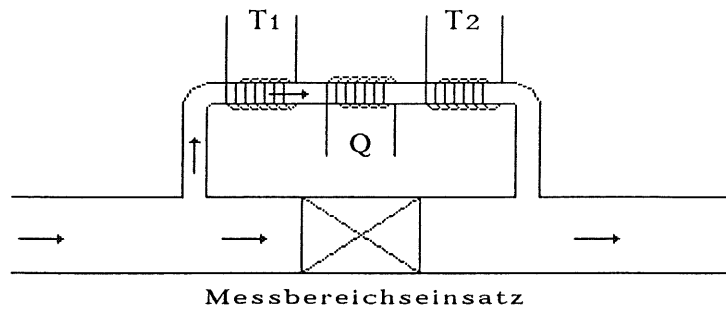


Fig.4

Für eine Abschätzung des Flusses, benötigt man eine Gleichung aus der Wärmelehre:

$$\Delta Q = cm\Delta T \quad (1.3.1)$$

wobei Q : Wärmemenge
 m : Masse
 ΔT : Temperaturdifferenz
 c : spezifische Wärme

Die Masse m ist das Produkt aus der Dichte ρ und dem Volumen V :

$$m = \rho V \quad (1.3.2)$$

Aus dem vorhergehenden Abschnitt wissen wir, dass für den Fluss Φ gilt:

$$\Phi = \frac{dV}{dt} \quad (1.2.3)$$

Wir erhalten durch Differenzieren von (1.3.1):

$$\dot{Q} = c\rho\Phi\Delta T \quad (1.3.3)$$

Der Fluss Φ ist also proportional zum Verhältnis der abgegebenen Leistung \dot{Q} und der Temperaturdifferenz ΔT :

$$c\rho\Phi = \frac{\dot{Q}}{\Delta T} \quad (1.3.4)$$

Die elektronischen Massenflussmesser geben den Fluss proportional zu einer Ausgangsspannung V an:

$$V = k \frac{\dot{Q}}{\Delta T} = kc\rho\Phi \quad (1.3.5)$$

Die Gasdichte ρ ist immer als Normdichte zu verstehen. Da die Massenflussregler geeicht werden müssen, muss auch angegeben werden, welches die Normbedingungen für die Eichung waren.

Die Massenflussregler, die hier benutzt wurden, sind auf 0 °Celsius und 1013.25 mbar geeicht worden.

Die Messelektronik des Massenflussmessers liefert also bei konstanter Leistungsabgabe \dot{Q} ein Ausgangssignal V , das proportional zum Kehrwert der Temperaturdifferenz ist. Wird nun ein Massenflussmesser zusätzlich mit einem Magnetnadelventil und einem Regelkreis ausgerüstet, so erhält man einen selbständig arbeitenden Flussregler, der das Magnetnadelventil so steuert, dass die Eingangsspannung V_{in} gleich der Ausgangsspannung V_{aus} ist.

Da hier nur eine Differenztemperatur für das Ausgangssignal benötigt wird, ist dieser Massenflussregler nahezu unabhängig von Temperaturschwankungen.

Ist ein Massenflussmesser auf ein Gas 1 mit c_1 und ρ_1 geeicht worden, und wird für ein Gas 2 mit c_2 und ρ_2 verwendet, so gilt:

$$V_1 = kc_1\rho_1\Phi \quad (1.3.6)$$

$$V_2 = kc_2\rho_2\Phi \quad (1.3.7)$$

Wenn in beiden Fällen der gleiche Fluss durch den Massenflussmesser fließt, gilt also:

$$\boxed{V_1 = \frac{c_1\rho_1}{c_2\rho_2} V_2} \quad (1.3.8)$$

Die Ausgangssignale unterscheiden sich um einen gasspezifischen Konversionsfaktor C_{fg} .

$$C_{fg} = \frac{c_1\rho_1}{c_2\rho_2} \quad (1.3.9)$$

Es ist möglich mit Hilfe eines solchen Konversionsfaktors beliebige Gase mit einem Massenflussmesser zu messen.

Die Messgenauigkeit der elektronischen Massenflussmesser wird vom Hersteller mit jeweils 1.5% Fehler auf den maximalen Durchfluss angegeben. Bei unseren Geräten, die einen maximalen Fluss von 96 lph

(lph = Liter pro Stunde) aufweisen, bedeutet dies einen absoluten Fehler von beinahe 1.5 lph über den gesamten Messbereich. Falls mit einem Konversionsfaktor gearbeitet wird, ändert sich bei gleichem maximalen Ausgangssignal V_{aus} der maximale Fluss, der durch den Massenflussmesser strömt. Man erhält somit einen absoluten Fehler der Grössenordnung $C_{fg} \cdot 1.5$ lph.

Für die Massenflussregler, die hier benutzt wurden, gelten folgende Spezifikationen:

F1 : Massenflussregler	Argon	96 lph \equiv 5 V
F2 : Massenflussregler	Methan	96 lph \equiv 5 V
F3 : Massenflussregler	CO ₂	96 lph \equiv 5 V
F4 : Massenflussregler	Isobutan	96 lph \equiv 5 V
F5 : Massenflussmesser	Argon	96 lph \equiv 5 V

Die Bezeichnung F1...F5 ist der Fig.1 zu entnehmen. Es ist zu beachten, dass F5 nur ein Messgerät ist. Die Einheit Liter pro Stunde (lph) bezieht sich immer auf Normliter pro Stunde; d.h. auftretende Volumina müssen jeweils auf Normbedingungen (0° Celsius und 1013.25 mbar) umgerechnet werden.

1.4 Der Durchflusswascher

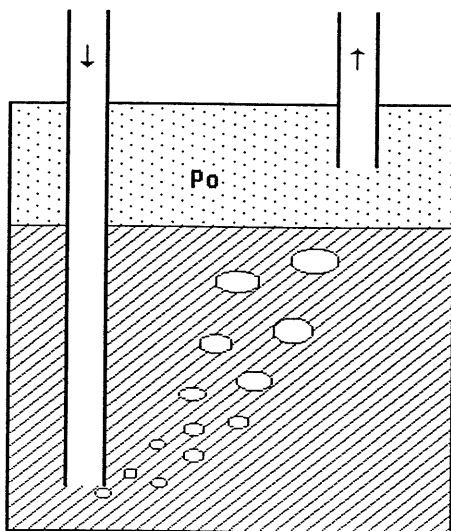


Fig.5

Die Anreicherung der die Flüssigkeit durchströmenden Gase im Durchflusswascher (s.Fig.5) schätzen wir wie folgt ab:

In der Regel ist das eintretende Gas Argon und die Flüssigkeit Methylal ($H_3CO-CH_2-OCH_3$). Im Durchflusswascher herrscht Gleichgewicht; d.h. der Partialdruck des Methylaldampfs im Argon ist gleich dem Dampfdruck des Methylals.

Der Gasdruck P_0 im Durchflusswascher ist gleich dem äusseren Luftdruck, da das Gassystem am Ende offen ist.

Der Partialdruck des Argons P_A und des Methylals P_M sind mit den entsprechenden Volumina durch die Gasgleichung $pV = \text{const}$ verbunden, da die Temperatur identisch ist.

$$\frac{P_M V_M}{P_A V_A} = \text{const} \quad (1.4.1)$$

Das relevante Volumen ist für beide Gase dasjenige der Blase; d.h. $V_A = V_M$

$$\frac{P_M}{P_A} = \text{const} \quad (1.4.2)$$

Für das Volumenverhältnis bei Normdruck gilt aber:

$$\frac{\overset{\circ}{V}_M}{\overset{\circ}{V}_A} = \text{const} \quad (1.4.3)$$

Das Verhältnis der Partialdrucke ist also gleich dem Verhältnis der Volumina bei Normdruck.

$$\frac{P_M}{P_A} = \frac{\overset{\circ}{V}_M}{\overset{\circ}{V}_A} \quad (1.4.4)$$

Auflösen dieser Gleichung nach $\overset{\circ}{V}_M$ und Division durch t gibt mit (1.2.3):

$$\Phi_M = \frac{P_M}{P_A} \Phi_A \quad (1.4.5)$$

Der Partialdruck des Methylals ist gleich dem Dampfdruck des Methylals:

$$P_M = P_D \quad (1.4.6)$$

Der Partialdruck des Argons ist gleich dem Luftdruck reduziert um den Dampfdruck des Methylals:

$$P_A = P_o - P_D \quad (1.4.7)$$

Also gilt für den ausströmenden Methylalfluss:

$$\Phi_M = \frac{P_D}{P_o - P_D} \Phi_A \quad (1.4.8)$$

Da der Dampfdruck einer Flüssigkeit stark temperaturabhängig ist, stellt man einen Bubbler in einen Kühltank, wo die Temperatur relativ einfach auf einem konstanten Wert gehalten werden kann.

Eine kleine Rechnung zeigt den typischen Methylalverbrauch. Dem Gasgemisch wird üblicherweise 5% Methylaldampf beigemischt. Bei einem Gasfluss von total 20 lph ergibt dies einen Methylalfluss von 1 lph. 1 Liter Gas bei Kühlschranktemperatur entspricht ungefähr 1/22 Mol. Das Molgewicht von Methylal ist 76 g/Mol, d.h. pro Stunde werden 3.5 g Methylal verdampft. Bei einer Dichte von 0.86 g/cm³ entspricht dies also einem Verbrauch von 0.004 Litern flüssiges Methylal pro Stunde oder 1 Liter in 12 Tagen.

Da in die Formel zur Bestimmung des Methylalflusses der Dampfdruck eingeht, benötigt man ein Hilfsmittel um diesen zu bestimmen. Nach Antoine [2] kann der Dampfdruck einer Flüssigkeit nach folgender Formel gefunden werden:

$$\text{Log}_{10} \text{PD} = A - \frac{B}{C+t} \quad (1.4.9)$$

A,B,C sind flüssigkeitsspezifische Konstanten, wobei t in °Celsius und PD in mmHg gemessen wird.

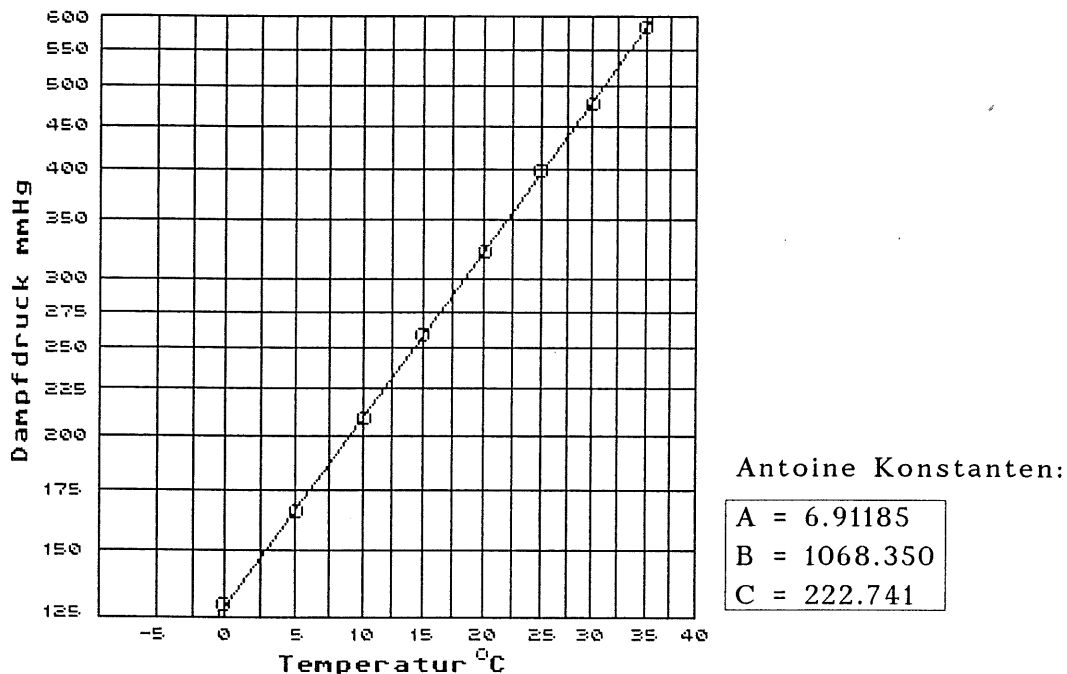


Fig.6 Dampfdruckkurve für Methylal

Graphik aus: Shuzo Ohe
 Computer aided data book of vapor pressure
 Databook Publishing Company, 1976

Der Einfluss der Schwankung von Dampfdruck und Luftdruck auf den Methylalfluss soll hier abgeschätzt werden:

Der Methylalfluss Φ_M ist proportional zum Gasfluss Φ_A , der durch den Bubbler strömt. Um einen definierten Anteil Methylal im Gasgemisch zu erhalten, muss also noch Gas dem Gemisch zugeführt werden, das nicht durch den Bubbler strömen darf; dieses Gas strömt mit dem Fluss Φ_B . Es gilt also, wenn n der Anteil des Methylals im Gemisch ist:

$$\frac{\Phi_M}{\Phi_M + \Phi_A + \Phi_B} = n \quad (1.4.10)$$

$$\Phi_M = \gamma \Phi_A \quad (1.4.11)$$

$$\gamma = \frac{PD}{P_0 - PD} \quad (1.4.12)$$

Der Faktor γ heisst Flussfaktor.

Einsetzen von (1.4.11) in (1.4.10) ergibt:

$$\frac{\gamma}{\gamma + 1 + \frac{\Phi_B}{\Phi_A}} = n \quad (1.4.13)$$

Die beiden Flüsse Φ_A und Φ_B werden mit den elektronischen Massenflussregler gesteuert, sie sind also unabhängig von Druck- und Temperaturschwankungen. Die Schwankung von n erhält man durch Differenzieren; wobei Differenzieren nach dem Druck oder nach der Temperatur bedeutet:

$$\dot{n} = \frac{\dot{\gamma} \left(1 + \frac{\Phi_B}{\Phi_A} \right)}{\left(\frac{\gamma}{n} \right)^2} \quad (1.4.14)$$

Unter Verwendung von (1.4.13) folgt:

$$\dot{n} = \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} n(1-n) \quad (1.4.15)$$

Für die Ableitung nach dem Luftdruck gilt:

$$\dot{\gamma} = - \frac{P_D}{(P_o - P_D)^2} = - \frac{\gamma}{P_o - P_D} \quad (1.4.16)$$

Somit folgt aus (1.4.15) und (1.4.16):

$$\Delta n = - \frac{n(1-n)}{P_o - P_D} \Delta P \quad (1.4.17)$$

Einsetzen von folgenden typischen Werten

$$\begin{aligned} n &= 0.05 \\ P_o &= 960 \text{ mbar} \\ P_D &= 240 \text{ mbar} \end{aligned}$$

ergibt:

$$\Delta n = -0.000066 \text{ pro mbar} \quad (1.4.18)$$

Für die Ableitung nach der Temperatur gilt:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{P}_D(P_D - P_o) + P_D \dot{P}_D}{(P_o - P_D)^2} \quad (1.4.19)$$

$$= \left(\frac{\gamma}{P_D} \right)^2 P_o \dot{P}_D \quad (1.4.20)$$

Die Ableitung des Dampfdrucks findet man durch Differentiation der Antoinegleichung (1.4.9):

$$\dot{P}_D = P_D \ln 10 \frac{B}{(C+t)^2} \quad (1.4.21)$$

Somit gilt für $\dot{\gamma}$ mit (1.4.19) und (1.4.21):

$$\dot{\gamma} = \gamma(1+\gamma) \ln 10 \frac{B}{(C+t)^2} \quad (1.4.22)$$

Für Δn gilt also mit (1.4.15) und (1.4.22):

$$\Delta n = (1+\gamma) \ln 10 \frac{B}{(C+t)^2} n(1-n) \Delta T \quad (1.4.23)$$

Einsetzen von folgenden typischen Werten

$$\begin{aligned}n &= 0.05 \\P_o &= 960\text{mbar} \\P_D &= 240\text{mbar} \\Y &= 0.3333 \\B &= 1068.350 \\C &= 222.741 \\t &= 6.7^\circ\text{C}\end{aligned}$$

ergibt:

$$\Delta n = 0.003 \text{ pro } ^\circ\text{Celsius} \quad (1.4.24)$$

Es ist wichtig, die Temperatur möglichst stabil zu halten. Der Einfluss des Luftdrucks kann nur mit grossem Aufwand verhindert werden, man muss damit leben. Wie die Abschätzung gezeigt hat, genügt es einmal pro Tag, den neuen Luftdruck dem Gassystem bekannt zu geben, ohne dass die Mischung davondriftet.

1.5 Gesamtkonzept

Die Gasmischanlage besteht aus einem mechanischen Teil mit Frontplatte, Flussmessern, Ventilen, Kupferrohren, Durchflusswascher, Kühltank und aus einem elektronischen Teil mit Computer, Analog/Digital-Wandler und der ganzen Spannungsversorgung. Alle diese Komponenten sind in einem Standard 15 Zoll Elektronikrahmen untergebracht. Die Anordnung ist nebenstehendem Bild (s.Fig.7) zu entnehmen. Der Computer, ein Mandax AT mit einem 80386 Prozessor, befindet sich zwischen der eigentlichen Mischanlage und dem Kühltank. Die 5 Netzschalter über dem Kühltank unterbrechen die gesamte Stromversorgung sowie zwei Steckerleisten; eine für den Kühltank und eine für Computer und Netzgeräte für die Massenflussregler und die Magnetventile.



Fig.7 Gasmischanlage

Die Netzgeräte für die Massenflussregler und die Magnetventile lassen sich nur einschalten, wenn gleichzeitig der Computer eingeschaltet ist. Auf der Rückseite wird mit je einem Handventil der Einlass, bzw. die Entlüftung für den Durchflusswascher betätigt. Das Methylal fließt zuerst in einen Reservetank im Kühlschranks, wo es gekühlt wird, danach lässt es sich mit einem Handventil im Kühlschranks in den Durchflusswascher leiten. Ein weiteres Handventil dient zur Entleerung.

1.6 Probleme

Mit dem vorher beschriebenen Aufbau wurden vor der Inbetriebnahme noch einige Eichmessungen durchgeführt:

Die erste Messung bezog sich auf den Druckabfall über den Flussmessern. Mit einem mit Öl gefüllten U-Rohr kann man diesen relativ einfach bestimmen (s. Fig. 8).

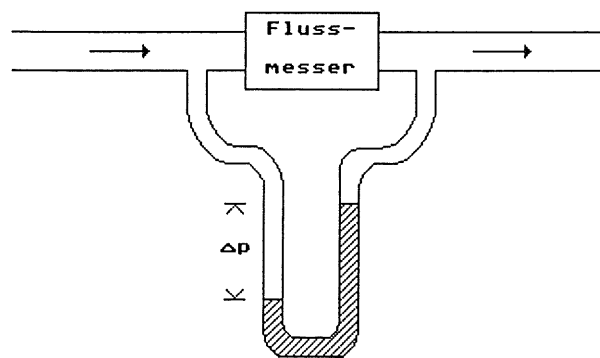


Fig. 8 Messen des Druckabfalls

Die Messresultate sind in Fig.9 dargestellt.

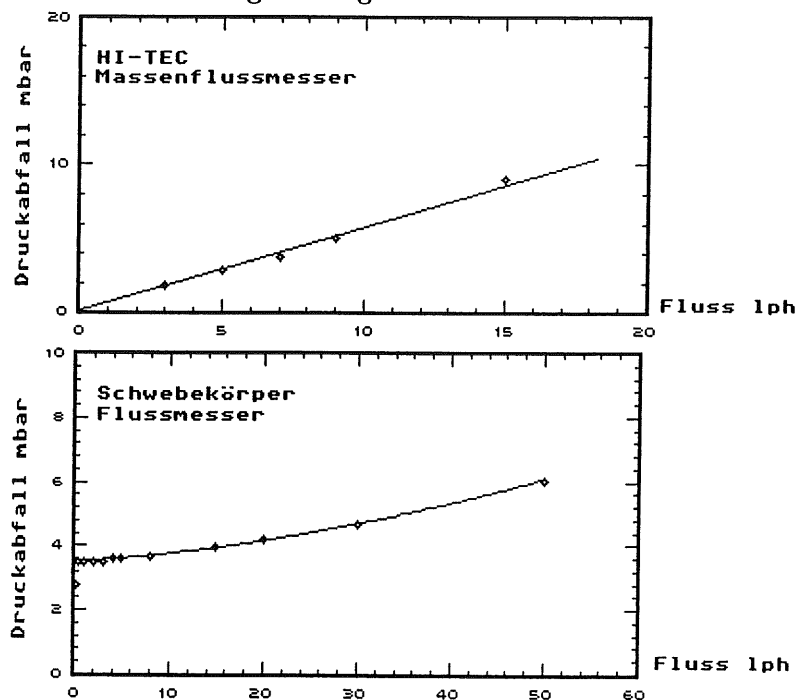


Fig.9 Druckabfall über den Flussmessern

Beim Massenflussmesser hängt der Druckabfall linear vom Fluss ab. Der Schwebekörperflussmesser zeigt schon bei kleinsten Flüssen einen Druckabfall von 3.6 mbar, dies dürfte hauptsächlich durch die Trägheit der Kugel hervorgerufen werden.

Soll mit Hilfe des Flussmessers am Ausgang des Gassystems (F5 in Fig.1) der Eingangsfluss mit dem Ausgangsfluss verglichen werden, d.h. die Dichtigkeit der Kammer untersucht werden, so kann dies nur geschehen, wenn die Kammer den durch den Druckabfall vom Flussmesser bedingten Überdruck verträgt.

Die Leichtbauweise unserer Testkammer erlaubt nur einen Überdruck von 1 mbar, F5 wurde deshalb nicht verwendet.

In der zweiten Messung wurde die Mess- und Regelgenauigkeit der Massenflussregler überprüft. Dazu musste mit einer unabhängigen Methode der Gasfluss bestimmt werden.

Lässt man Gas in einen auf dem Kopf stehenden, mit Wasser gefüllten

Glaszylinder strömen, so drückt das einströmende Gas das Wasser aus dem Zylinder heraus. Der Fluss lässt sich aus dem verdrängten Volumen und der verstrichenen Zeit bestimmen. Dabei muss die Umrechnung auf Normliter berücksichtigt werden.

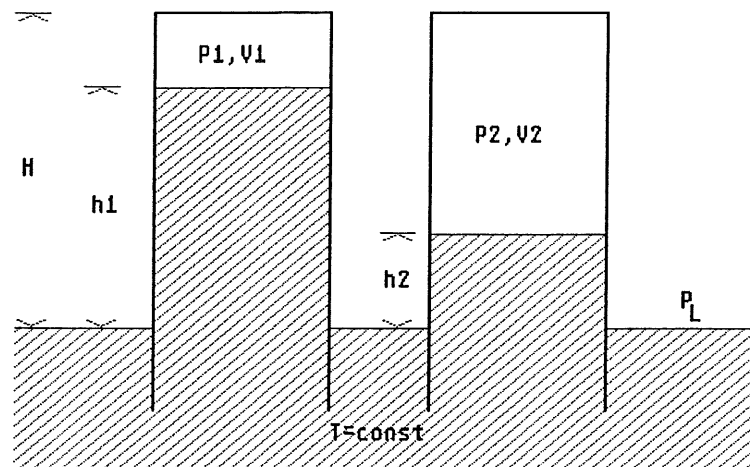


Fig.10

Im Anfangszustand sei der Zylinder bis zur Höhe h_1 mit Wasser angefüllt. Das Restvolumen V_1 lässt sich somit aus dem Querschnitt Q und der Höhe H des Zylinders berechnen:

$$V_1 = Q(H-h_1) \quad (1.6.1)$$

Der dort herrschende Druck P_1 plus der statische Druck der Wassersäule steht im Gleichgewicht mit dem Luftdruck P_L . Somit lässt sich P_1 bestimmen:

$$P_1 = P_L - \rho g h_1 \quad (1.6.2)$$

Wobei: ρ : Dichte von Wasser
 g : Erdbeschleunigung

Unter Verwendung der idealen Gasgleichung

$$PV = \nu RT \quad (1.6.3)$$

lässt sich die Anzahl Mole im Volumen V_1 bestimmen:

$$v_1 = \frac{P_1 V_1}{RT} \quad (1.6.4)$$

Dieselbe Überlegung gilt natürlich auch für den Endzustand, nachdem v Mol Gas in den Zylinder eingeströmt sind.

$$v_2 = \frac{P_2 V_2}{RT} \quad (1.6.5)$$

Die Anzahl Mole v , die in den Zylinder einströmen, ist gleich der Differenz der Anzahl Mole v_1 im Anfangszustand und der Anzahl Mole v_2 im Endzustand:

$$v = v_2 - v_1 \quad (1.6.6)$$

Das Normvolumen V_n bestimmt sich aus dem Normvolumen V^* , das 1 Mol Gas beansprucht ($V^* = 22.41383$ Liter/Mol).

$$V_n = v V^* \quad (1.6.7)$$

Dies ergibt unter Verwendung von (1.6.4), (1.6.5), (1.6.6) und (1.6.7):

$$V_n = \left(P_2 V_2 - P_1 V_1 \right) \frac{V^*}{RT} \quad (1.6.8)$$

Vergleicht man das Normvolumen V_n mit dem tatsächlichen Volumen $V_2 - V_1$, so stellt man fest, dass das Normvolumen ungefähr 85% des tatsächlichen Volumens ausmacht¹⁾.

$$V_n \approx 0.85 \times (V_2 - V_1) \quad (1.6.9)$$

Um einen Flussregler zu eichen, müssen mehrere Messpunkte gemessen werden. Am einfachsten geht dies, wenn am Zylinder zwei Markierungen angebracht werden. Wenn der Wasserspiegel die erste Markierung passiert, ist dies das Startsignal für die Stoppuhr, bei der zweiten Markierung wird dann die Zeit gestoppt. Auf diese Weise geht immer dasselbe Volumen V_n in die Messung ein. Flüsse über 20 lph sind allerdings schwierig zu messen, da wegen der starken Blasenbildung im Zylinder der Wasserstand nur ungenau abgelesen werden kann.

Meine Markierungen am Zylinder entsprachen einem tatsächlichen Volumen von 400ml, was einem Normvolumen von 342ml - 345ml (je nach Luftdruck und Temperatur) entspricht.

¹⁾ Eine analoge Rechnung für das Van-der-Waals-Gas ergibt unter ziemlichem Mehraufwand ein Normvolumen, das je nach Gas um höchstens 0.5% vom obigen abweicht.

Die elektronischen Massenregler stellen auf Grund einer Eingangsspannung V_{in} einen Gasfluss ein. Wenn die Ausgangsspannung V_{aus} gleich der Eingangsspannung V_{in} ist, wird das Gas in den Zylinder geleitet. Die so ermittelten Daten sind hier graphisch dargestellt (s. Fig.11-14).

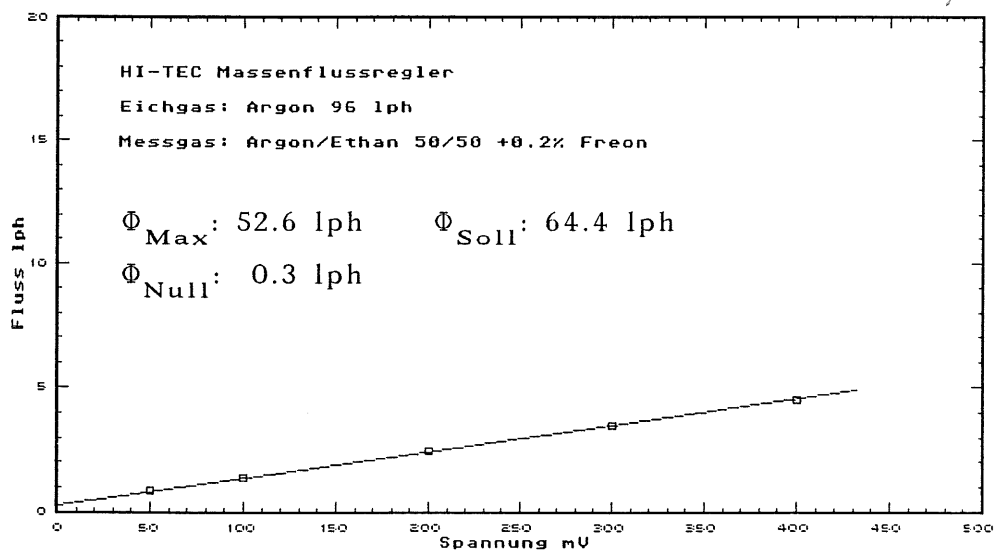
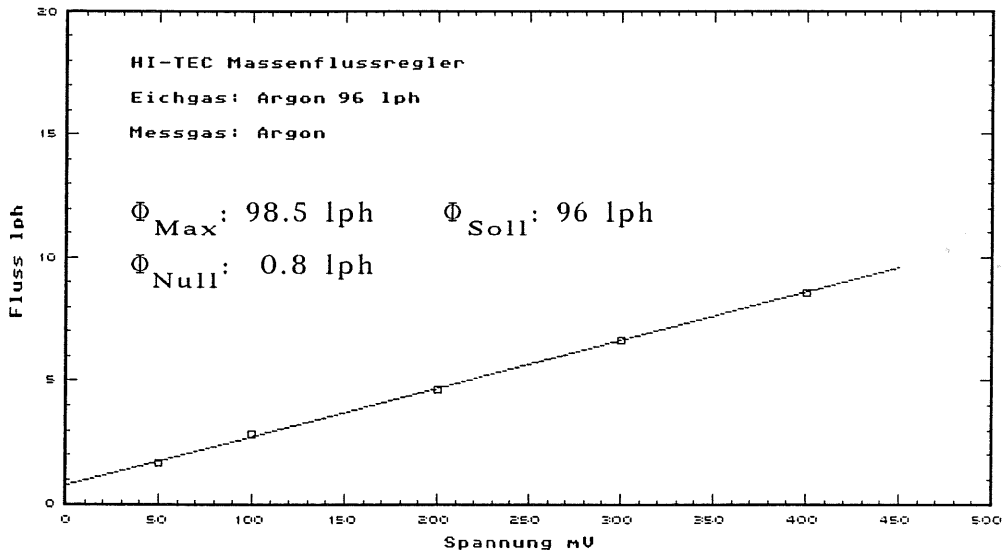


Fig.11 Eichprotokoll des Argon-Massenflussreglers

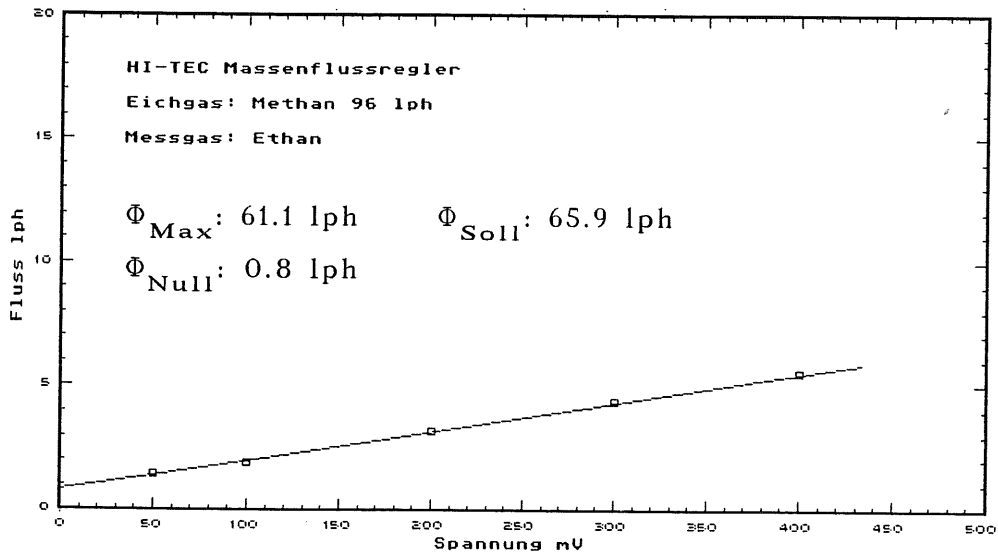
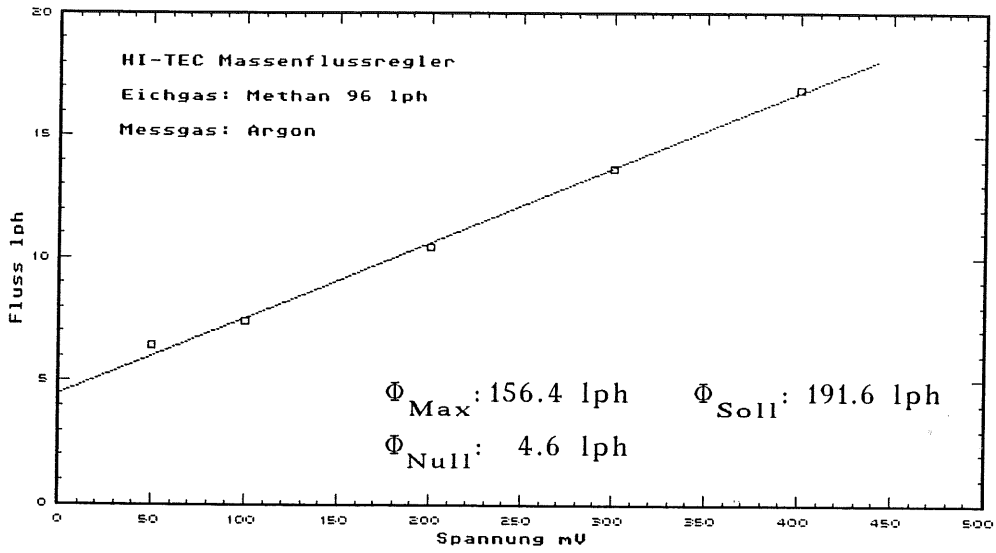


Fig.12 Eichprotokoll des Methan-Massenflussreglers

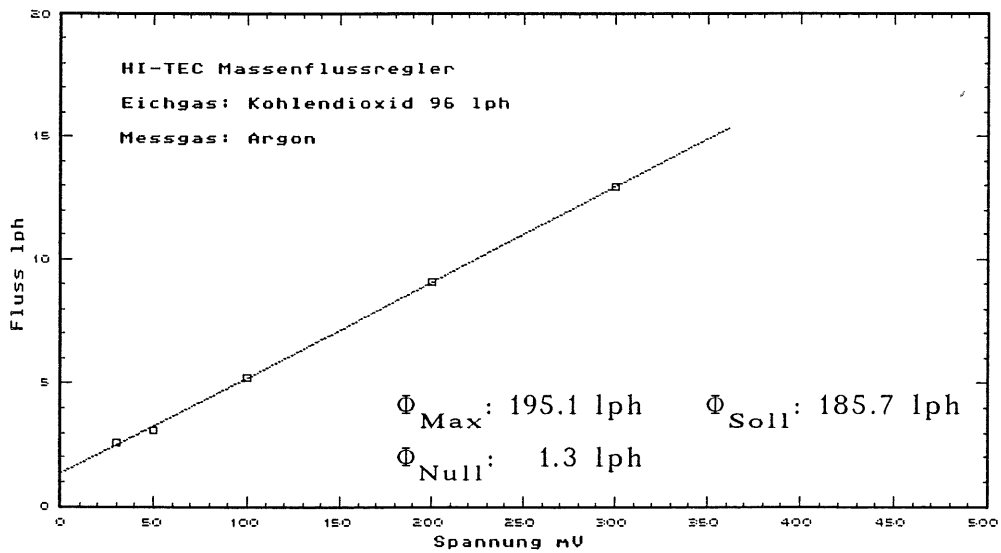
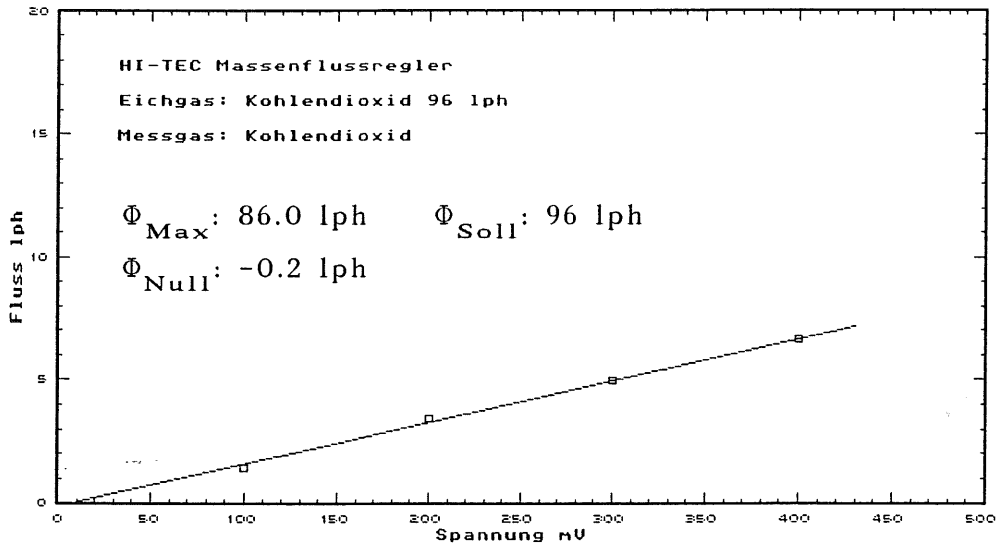


Fig.13 Eichprotokoll des Kohlendioxid-Massenflussreglers

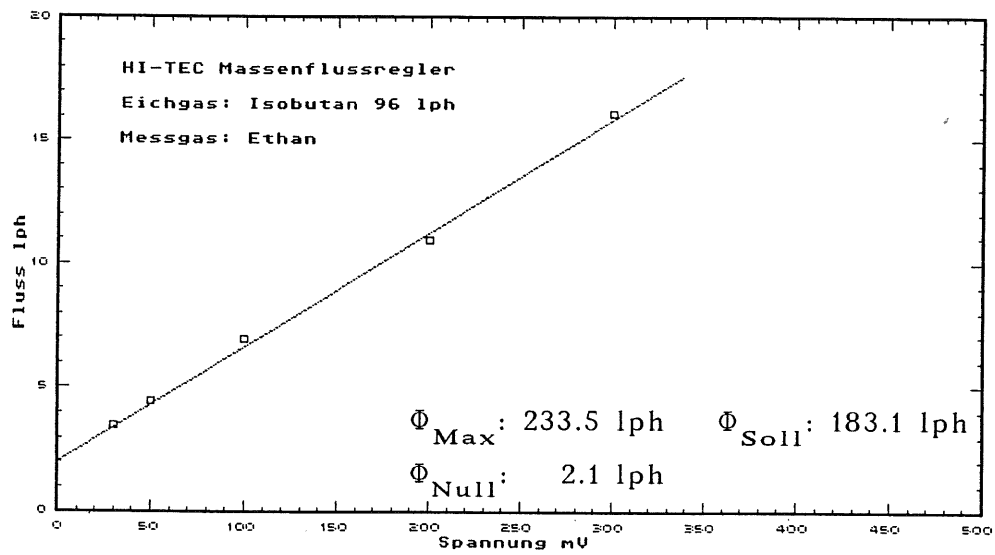
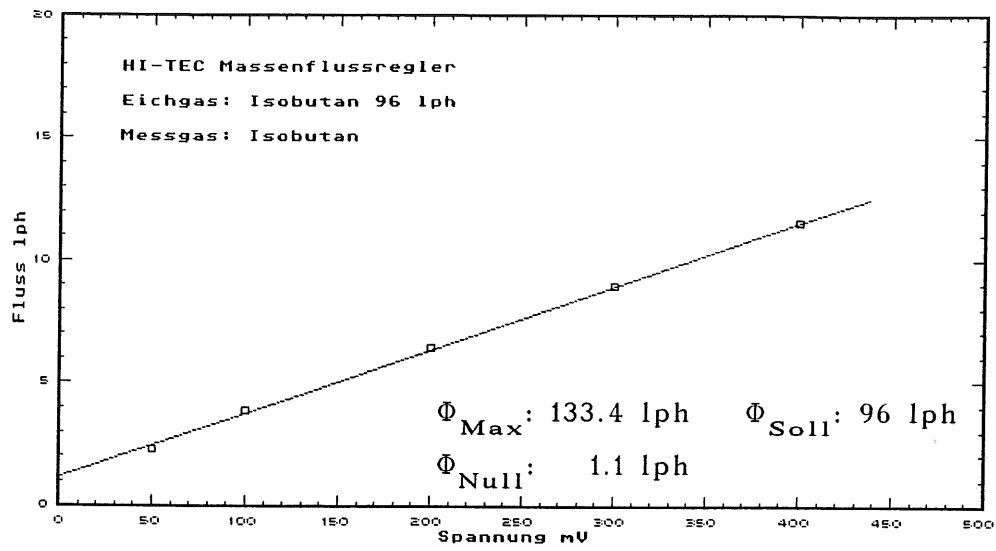


Fig.14 Eichprotokoll des Isobutan-Massenflussreglers

Φ_{Max} und Φ_{Null} charakterisieren die Gerade, die durch die Messpunkte gelegt wurde. Dabei bedeutet Φ_{Max} den Fluss, den man bei einer Eingangsspannung V_{in} von 5000 mVolt erwarten würde. Φ_{Null} beschreibt den Fluss bei einer Spannung von 0 mV.

Φ_{Soll} ist der Fluss, den die Herstellerfirma bei einer Eingangsspannung von 5000 mVolt angibt. Dort, wo nicht das Eichgas durch den Massenflussregler floss, wurde Φ_{Soll} mit Hilfe von Konversionsfaktoren berechnet (Vgl. 1.3).

Der Methan- und der Isobutanmassenflussregler wurden mit Luft geeicht, wobei die Werte für Methan bzw. Isobutan mit einem Konversionsfaktor umgerechnet wurden (s. Anhang).

Betrachtet man die Eichprotokolle (s. Fig. 11-14), so stellt man fest, dass die Massenflussregler zwar ein lineares Verhalten zeigen, sonst aber nur ungefähr die gewünschten Flüsse anzeigen. Vorallem dort, wo mit einem Konversionsfaktor gearbeitet wurde, ist die Übereinstimmung zwischen Φ_{Max} und Φ_{Soll} besonders schlecht.

Die zum Teil hohen Werte für Φ_{Null} können nur durch eine Nullpunktspannung in der Elektronik erklärt werden. Da alle Erdleitungen mehrmals überprüft worden sind, muss diese Verschiebung eine Eigenschaft der Massenflussregler sein.

Da die Massenflussregler ein gutes lineares Verhalten zeigen, ist die Nullpunktverschiebung unwichtig. Es empfiehlt sich, für jedes Gas eine Eichung durchzuführen.

Versucht man, aus den gemessenen Flüssen wiederum Konversionsfaktoren zu bestimmen, so zeigt sich ein ähnliches Bild: Die gemessenen Konversionsfaktoren C_{fg} unterscheiden sich von den mit Formel (1.3.9) berechneten des Herstellers $C_{\text{fg}}^{\text{HT}}$ um bis zu 20%.

Argon/Kohlendioxid:	$C_{\text{fg}} = 2.2$	$C_{\text{fg}}^{\text{HT}} = 1.9342$
---------------------	-----------------------	--------------------------------------

Argon/Ethan:	$C_{\text{fg}} = 2.5$	$C_{\text{fg}}^{\text{HT}} = 2.909$
--------------	-----------------------	-------------------------------------

Isobutan/Ethan:	$C_{\text{fg}} = 0.57$	$C_{\text{fg}}^{\text{HT}} = 0.5242$
-----------------	------------------------	--------------------------------------

Argon/Gasgemisch:	$C_{\text{fg}} = 1.9$	$C_{\text{fg}}^{\text{HT}} = 1.4902$
-------------------	-----------------------	--------------------------------------

Da die Eichprotokolle ein gutes lineares Verhalten zeigen, wurde jede Eichmessung nur einmal durchgeführt. Die Unsicherheit in der Messmethode schätze ich auf einige Prozent.

2. Computersteuerung des Gassystems

2.1 Analog/Digital-Wandler

Um mit einem Computer die Aussenwelt ansteuern zu können, wird ein Analog/Digital-Wandler benötigt. Dieser verarbeitet vom Computer kommende Bitmuster in eine elektrische Spannung, die somit das Eingangssignal V_{in} für die Massenflussregler bilden. Umgekehrt werden von den Massenflussreglern kommende Ausgangssignale V_{aus} vom Analog/Digital-Wandler in ein Bitmuster verwandelt, welches vom Computer interpretiert werden kann.

Hier wurde ein 12 Bit A/D-Wandler der RTI-Serie der Firma ANALOG DEVICES¹⁾ (RTI-820) [3] verwendet; der Spannungen im Bereich von ± 5 Volt setzen und lesen kann. Der RTI-820 ist als Computerkarte erhältlich, die in jeden IBM-compatiblen Computer passt.

2.2 Vervielfacher

Wird mehr als ein Kanal benötigt, kann mit einem Vervielfacher (STB-HL02) [4] ein Kanal der RTI-820 Karte in 4 Ausgangskanäle und 16 Eingangskanäle erweitert werden. Die 16 Eingangskanäle werden einzeln in rascher Abfolge zum RTI-820 geleitet. Die typische Umwandlungszeit beträgt $25 \mu s$ pro Kanal. Die Aufspaltung des Ausgangskanals in 4 Kanäle geschieht analog. Die vom RTI-820 ankommende Spannung wird vom Vervielfacher auf einen der 4 Kanäle geleitet, wobei die anderen drei Kanäle in der Zwischenzeit konstant gehalten werden. Hier beträgt die typische Umwandlungszeit $20 \mu s$.

Mit Hilfe von Widerstandsbrücken lässt sich der Vervielfacher so programmieren, dass die 4 Ausgangskanäle einen Bereich von 0-5 Volt abdecken. Der Bereich für die Eingangskanäle ist ± 5 Volt (programmierbar auf ± 10 Volt). Da das Auflösungsvermögen des A/D-Wandler 12 Bit ist, entspricht also 1 Bit = 1.2 mV auf den 4 Ausgangskanälen und 1 Bit = 2.4 mV auf den 16 Eingangskanälen.

¹⁾ Analog Devices, Inc. Industrial
Products Division
One Technology Way P.O. Box 9106

Norwood, MA 02062-9106

Vertreten in der Schweiz durch:

Analog Devices S.A.
9, rue de Berne
1201 Genf

2.3 Digitaler Schalter

Sollen mit dem Computer Geräte ein- oder ausgeschaltet werden, so bietet die RTI-820-Karte 24 digitale Ein- und Ausgangskanäle. Damit können Spannungen von 1.5 Volt gesetzt und auch gelesen werden. Dabei bedeutet eine Spannung von +1.5 Volt logisch 1 und 0 Volt logisch 0. Falls höhere Spannungen gesetzt oder gelesen werden sollen, bietet sich ein DB-24 [3] an. Dieses ist mit dem RTI-820 mit einem Flachbandkabel verbunden und kann Gleich- und Wechselfspannungen bis zu 280 Volt bei Strömen bis zu 3 Ampère schalten und lesen.

Dies geschieht mit *Relais* Modulen, die gleichzeitig 4 der 24 Kanäle bedienen. Diese 4 Kanäle können entweder Spannungen lesen oder Spannungen setzen (je nach Modul), weiter wird der Spannungsbereich durch das Modul definiert. Hier zum Beispiel wurde ein OD60Q Modul verwendet, welches Gleichspannungen in einem Bereich von 5-60 Volt schaltet (je nach Spannungsquelle).

2.4 Computerprogramme zur Ansteuerung des A/D-Wandlers

Das vom Hersteller mitgelieferte Computerprogramm [5] unterstützt nicht nur den A/D-Wandler, sondern auch noch weitere Produkte. Die spezielle Konfiguration wird mit dem Programm ADICONF.EXE geladen. Dieses Programm fragt den Benutzer über seine Installation aus (hier: RTI-820 mit einem STB-HL02 und ein DB-24, sowie welche Brücken gesetzt wurden und welche nicht, usw). All diese Daten werden im File CONFIGB.DAT abgelegt.

Mit dem Programm RTICAL.COM kann der RTI-820 und das STB-HL02 geeicht werden. Dazu benötigt man allerdings ein Spannungsgerät welches auf 4 Stellen genau Spannungen im Bereich ± 5 Volt liefert, und ein ebenso genaues Voltmeter. Mit einem Schraubenzieher müssen anschliessend die Potentiometer auf den Karten justiert werden.

Die Programmbibliothek die mitgeliefert wurde, unterstützt verschiedene Computersprachen wie z.B. *Macro Assembler*, *BASIC*, *C*, *FORTRAN*, *Pascal* und *TURBO-Pascal*.

Damit Programme in *TURBO-Pascal* geschrieben werden können, muss erst ein Treiber für *TURBO-Pascal* geladen werden. Dies geschieht durch Aufrufen des Programms PASLOAD.EXE. Am besten schreibt

man diesen Befehl ins AUTOEXEC.BAT, somit wird PASLOAD.EXE bei jedem Aufstarten des Computers automatisch aufgerufen.

Jedesmal, wenn in einem TURBO-Pascal Programm ein RTI-Befehl aufgerufen wird, wird dieser umgeleitet, sodass er im Programm PASLOAD ausgeführt wird.

Die TURBO-Pascal Version 5.5 [6], die ich benutzte, arbeitet mit *Units*. Eine Unit ist ein eigenständiger Teil eines Computerprogramms, welcher für sich allein compiliert werden kann. ADIFAR.TPU ist eine Unit. In ADIFAR.TPU stehen alle RTI-Befehle, welche von einem Programmierer aufgerufen werden können. Leider steht in ADIFAR.TPU nur der Befehlskopf, die dazugehörigen Unterprogramme stehen im File ADIEXTF.OBJ, von welchem allerdings kein Quelltext geliefert wurde.

Bevor in einem TURBO-Pascal Programm RTI-Routinen ausgeführt werden können, müssen zuerst mit dem Befehl INITIALIZE alle globalen Variablen definiert werden, das File CONFIGB.DAT muss gelesen werden und alle Kanäle auf dem RTI-820, dem STB-HL02 und dem DB-24 müssen initialisiert werden.

Erst jetzt kann mit der eigentlichen Programmierarbeit begonnen werden. Die Befehle, die ich für das Gassteuerungsprogramm benötigte, sind:

INITIALIZE : Initialisiert den A/D-Wandler
AIN820 : Initialisiert einen bestimmten Kanal für analoge Eingabe
AIN : Liest auf einem bestimmten Kanal ein analoges Signal
AOT820 : Initialisiert einen bestimmten Kanal für analoge Ausgabe
AOT : Schreibt auf einen bestimmten Kanal ein analoges Signal
DOTB820 : Initialisiert einen bestimmten Kanal für digitale Ausgabe
DOTB : Schreibt auf einen bestimmten Kanal ein Bit
CLCHAN : Löscht alle zuvor initialisierten Kanäle

Ausgerüstet mit diesem Grundwissen ist es nun möglich, ein Computerprogramm zu schreiben, welches die gesamte Gasmischanlage steuern kann.

3. Das Gassteuerungsprogramm

3.1 Anforderungen an das Programm

Ein zukünftiger Benutzer dieser Gasmischanlage soll in der Lage sein, Gas zu mischen, ohne stundenlang Gebrauchsanweisungen lesen zu müssen. Das Computerprogramm soll benutzerfreundlich sein und zugleich allen eventuellen Anforderungen gerecht werden.

Ein Benutzer muss dem Computer beibringen können, welche Gase an welchen Gaskanälen (1..4) angeschlossen sind, in welchen Verhältnissen diese Gase gemischt werden sollen, wie hoch der Gesamtfluss sein soll und ob Gas durch Flüssigkeit geleitet wird oder nicht. Weiter soll die Möglichkeit bestehen, die Massenflussregler zu eichen und diese Eichdaten zu speichern.

Da die Massenflussregler die einzelnen Komponenten des Gasgemischs eigenständig zu regeln vermögen, soll der Computer nicht zusätzlich in diesen Regelprozess eingreifen (Don't touch a working system). Der Computer schreibt nur einmal eine Sollspannung für jeden Massenflussregler, liest aber fortwährend die Ausgangsspannungen der Flussregler und rechnet diese in den aktuellen in Fluss um.

3.2 Starten des Programms

Bevor das Programm gestartet werden kann, muss PASLOAD.EXE aufgerufen werden, sofern dies nicht schon im AUTOEXEC.BAT aufgerufen wurde. Weiter müssen folgende Files in einem Directory zusammengefasst sein:

Volume in drive D has no label

Directory of D:\GAS

.	«DIR»		7-02-90	2:00p
..	«DIR»		7-02-90	2:00p
PC-GAS	EXE	109824	8-24-90	4:38p
HERC	BGI	6125	5-02-89	5:50a
GOTH	CHR	8560	5-02-89	5:50a
CONFIGB	DAT	95	5-22-90	1:35p
GAS	DAT	6469	8-24-90	1:48p

RTIERROR	DAT	1866	6-04-90	1:10p
BUBBLE	DAT	188	6-15-90	8:30a
PARAMETE	R	705	9-21-90	11:50a
CALIBRA1	DAT	1200	9-01-90	4:05p
CALIBRA3	DAT	900	9-03-90	7:01p
CALIBRA4	DAT	600	9-06-90	11:08a
CALIBRA2	DAT	1200	9-02-90	5:36p
15 File(s)		5562368 bytes free		

Das File PC-GAS.EXE ist das eigentliche Gassteuerungsprogramm. HERC.BGI und GOTH.CHR unterstützen die Graphikroutinen, die in PC-GAS benutzt werden. CONFIGB.DAT wird vom Treiber für den Analog/Digital-Wandler benötigt. GAS.DAT enthält alle gasspezifischen Informationen, so wie Gassorte, Konversionsfaktor, spezifische Wärme, Dichte und die chemische Formel für das Gas. Das File ist ein ASCII-Text-File, es kann also zusätzlich erweitert oder gekürzt werden. RTIERROR.DAT enthält alle Fehlermeldungen, die im Betrieb mit dem Analog/Digital-Wandler auftreten können. In BUBBLE.DAT stehen alle flüssigkeitsspezifischen Informationen für den Durchflusswascher, so wie Flüssigkeit, Antoinekonstanten und die chemische Formel der Flüssigkeit. Auch dieses File kann von jedem nach seinem Bedarf erweitert werden. Im File PARAMETE.R ist die zuletzt gespeicherte Konfiguration der Gasmischanlage abgelegt. Die Files CALIBRA1.DAT bis CALIBRA4.DAT enthalten die Eichprotokolle der Flussregler F1 bis F4. Ausser den Files PARAMETE.R und CALIBRA1.DAT bis CALIBRA4.DAT müssen alle Files in einem Directory vorhanden sein; PARAMETE.R und CALIBRA1.DAT bis CALIBRA4.DAT werden, falls sie nicht bereits existieren, vom Programm PC-GAS.EXE erzeugt. Ist ein solches Directory vorhanden, so kann mit dem Befehl PC-GAS das Programm gestartet werden. Bevor nun etwas auf dem Bildschirm sichtbar wird, werden Graphikbildschirm und der Analog/Digital-Wandler initialisiert. Falls alles in Ordnung ist, erscheint das Startsignet:

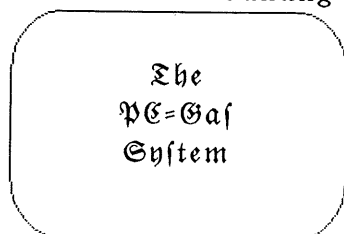


Fig.15 Startsignet

3.3 Übersicht über den Programmablauf

Um die Arbeitsweise des Gassteuerungsprogramms zu verstehen, betrachtet man am besten das Flussdiagramm (s.Fig.16).

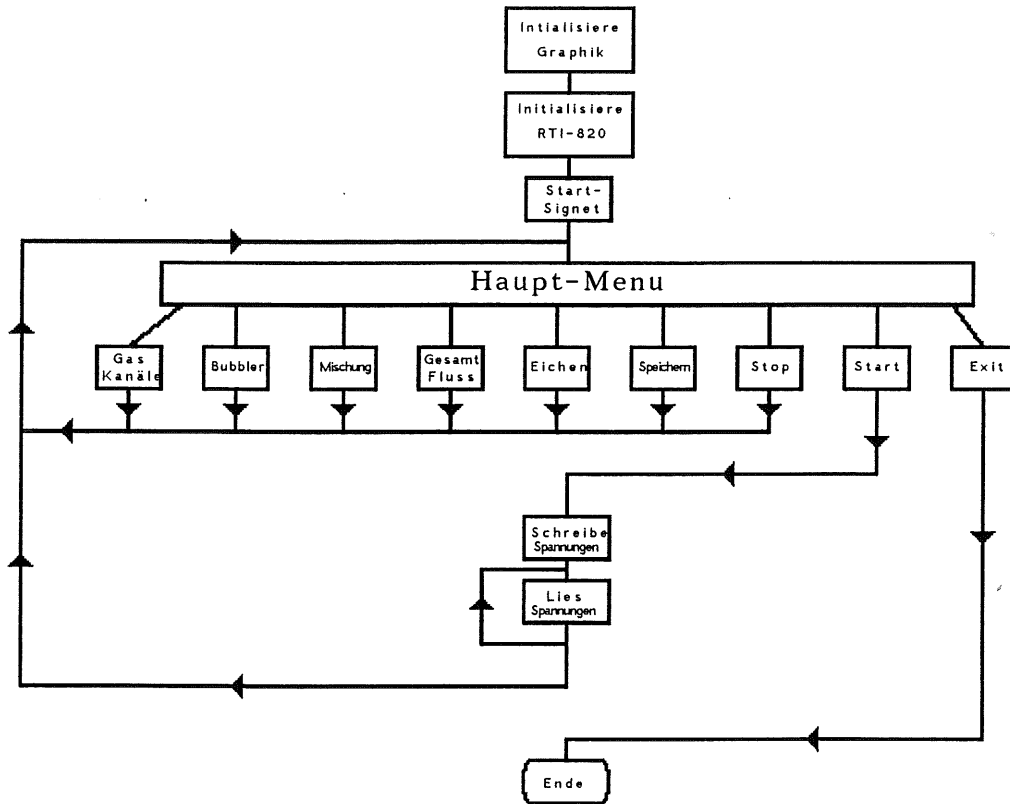


Fig.16 Flussdiagramm

Nachdem das Programm gestartet wurde und das Startsignet auf dem Bildschirm erschienen ist, kommt man durch Drücken einer beliebigen Taste in das Hauptmenu (s.Fig.17). Mit Hilfe der Pfeiltasten \uparrow \downarrow kann jeder Menüpunkt angewählt werden. Mit ENTER wird das angewählte Menu aufgerufen. In den Menus können wiederum weitere Untermenus mit den Pfeiltasten angewählt werden, welche wiederum mit ENTER aufgerufen werden. Mit ESC kann jedes Untermenü wieder verlassen werden, ohne irgendwelche Daten zu verändern.

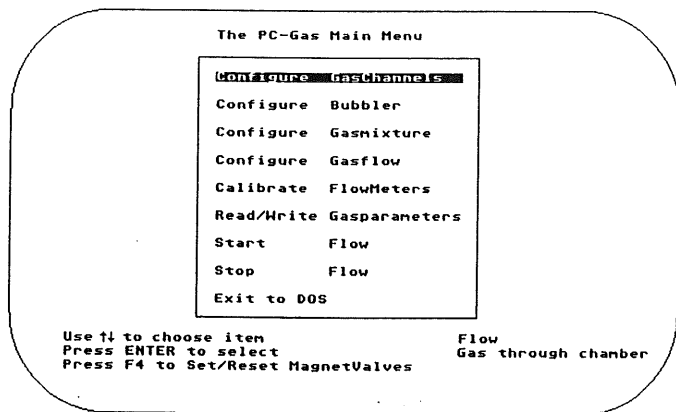


Fig.17 Haupt-Menu

wird angezeigt wie die Magnetventile stehen. *Gas through chamber* bedeutet, dass die Magnetventile so geschaltet sind, dass das Gas durch die Kammer fließt. Ist die Kammer vom Gassystem entkoppelt, so erscheint: *Gas through bypass*.

Ebenfalls unten rechts wird angezeigt, ob überhaupt Gas fließt. Die Meldung *Flow* bedeutet, es fließt Gas. *No Flow* heisst, es fließt kein Gas.

Im folgenden will ich jeden Menüpunkt einzeln erläutern.

3.4 Konfiguration der Gaskanäle

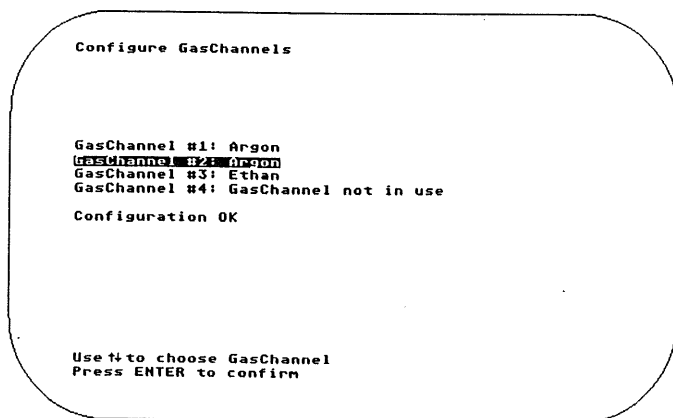


Fig.18 Konfiguration der Gaskanäle I

Nachdem ein Menüpunkt ausgeführt wurde, erscheint erneut das Hauptmenu. Jeder Menüpunkt kann somit unabhängig von anderen Menüpunkten aufgerufen werden. Dies ist vor allem dann nützlich, wenn nur Modifikationen vorgenommen werden.

Mit F4 werden die Magnetventile geschaltet. Unten rechts auf dem Bildschirm

Der erste Menüpunkt, der ausgewählt werden kann, ist die Konfiguration der Gaskanäle (*Configure GasChannels*). In diesem Menüpunkt sollen die vier Gaskanäle konfiguriert werden; es soll festgelegt werden, welches Gas an welchen Gaskanal angeschlossen ist.

Mit den Pfeiltasten wird derjenige Gaskanal ausgewählt, der als nächstes konfiguriert

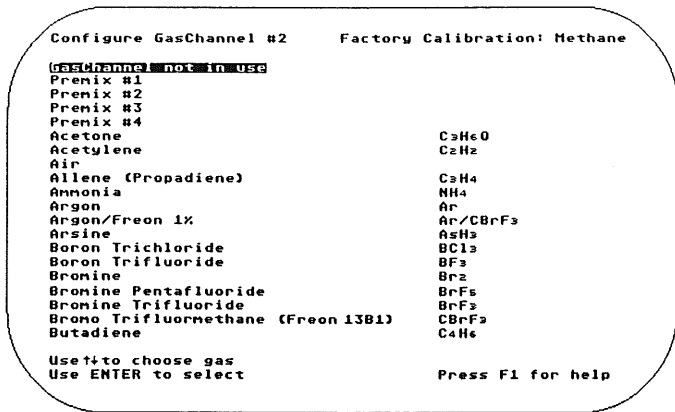


Fig.19 Konfiguration der Gaskanäle II

GAS.DAT gespeicherten Daten für das angewählte Gas sichtbar. Mit ENTER wird das angewählte Gas in den spezifizierten Gaskanal konfiguriert.

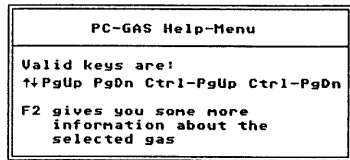


Fig.20 Hilfsmenu

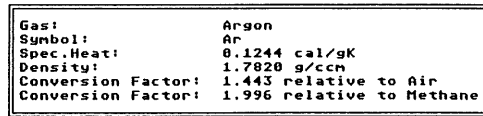


Fig.21 Informationsmenu I

Nachdem alle vier Gaskanäle auf diese Art konfiguriert wurden, kann durch Anwählen von *Configuration OK* das Menu verlassen werden.

3.5 Konfiguration des Durchflusswaschers

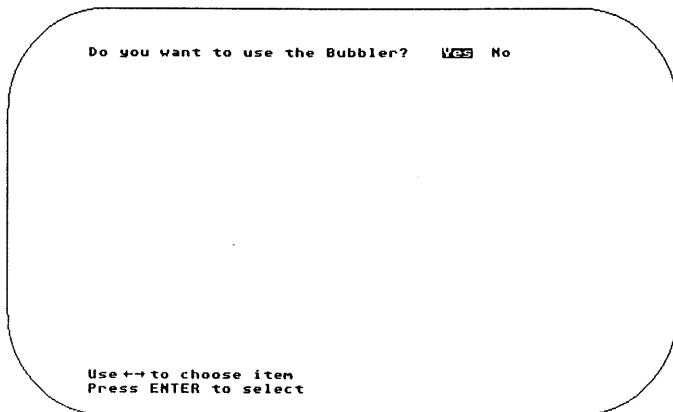


Fig.22 Konfiguration des Durchflusswaschers I

werden soll. Mit ENTER gelangt man in ein Untermenü, in welchem das Gas für den spezifizierten Gaskanal gewählt werden kann. Dies geschieht wiederum mit den Pfeiltasten. Ein Gaskanal kann unbenutzt bleiben. Mit der Funktionstaste F1 kann ein Hilfsmenu aufgerufen werden, welches dem Benutzer weitere Tips gibt. Mit F2 werden die in

Nachdem die Gaskanäle konfiguriert wurden, leuchtet automatisch der nächste Menüpunkt auf (*Configure Bubbler*).

Hier wird der Benutzer gefragt, ob er Gas durch Flüssigkeit leiten will oder nicht. Je nach Antwort wird der Benutzer aufgefordert,

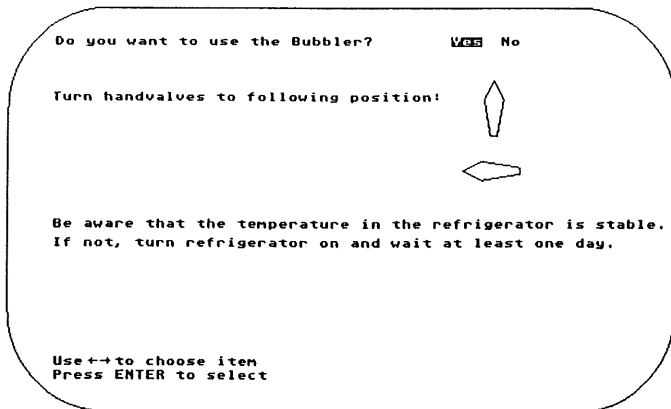


Fig.23 Konfiguration des Durchflusswaschers II

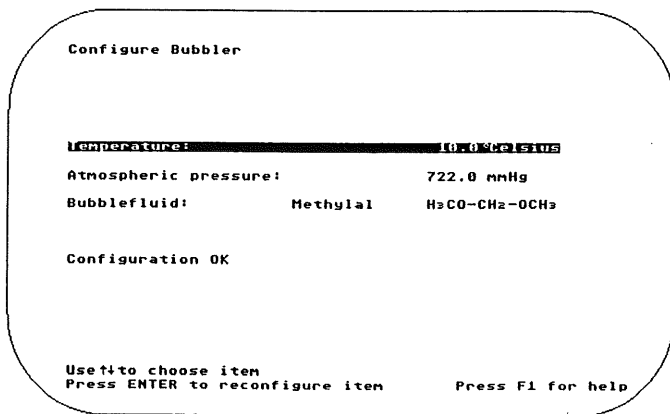


Fig.24 Konfiguration des Durchflusswaschers III

Formel werden auch die Antoinekonstanten, der Flussfaktor und das maximale Mischungsverhältnis angegeben.

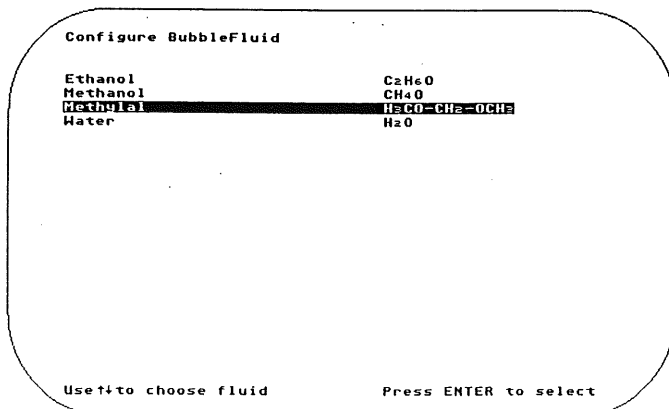


Fig.25 Konfiguration des Durchflusswaschers IV

Bubblefluid:	Methylal
Symbol:	H3CO-CH2-OCH3
Antoine Constants:	
A:	6.91185
B:	1068.35000
C:	222.74100
Temperature:	10.0 °C
Atmospheric pressure:	722.0 mmHg
Flowfactor:	0.4093
Maximun possible mixing:	29.04%

Fig.26 Informationsmenu II

die Handventile auf der Frontplatte in die richtige Position zu bringen. Die Position dieser Ventile kann vom Computer nicht überprüft werden, es ist also wichtig, dass diese korrekt gestellt sind.

Falls der Durchflusswascher nicht gebraucht wird, gelangt man mit ENTER wieder in das Hauptmenu zurück. Andernfalls wird man durch Drücken von ENTER aufgefordert die Kühlschrantemperatur und den Luftdruck einzugeben. Diese beiden Grössen werden nicht vom Computer gemessen.

Im weiteren muss die Flüssigkeit konfiguriert werden. Dies geschieht analog wie beim Gas.

Mit F2 erhält man zusätzliche Informationen über die aktuelle Konfiguration. Ausser der Flüssigkeit samt

3.6 Konfiguration der Gasmischung

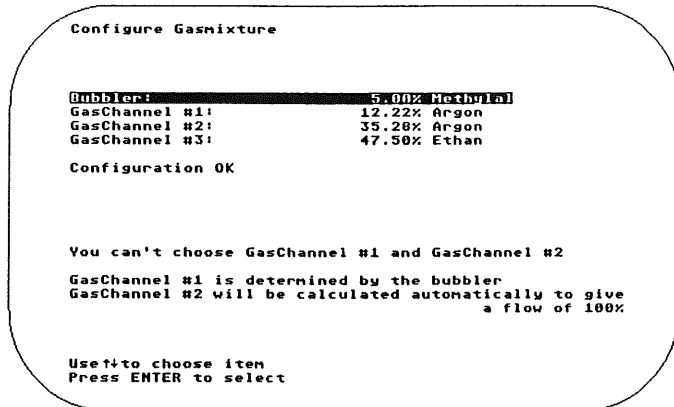


Fig.27 Konfiguration der Gasmischung

gewünschte Methylalfluss den Fluss durch den ersten Gaskanal, d.h. der erste Gaskanal kann nicht mehr beeinflusst werden.

3.7 Der Gesamtfluss

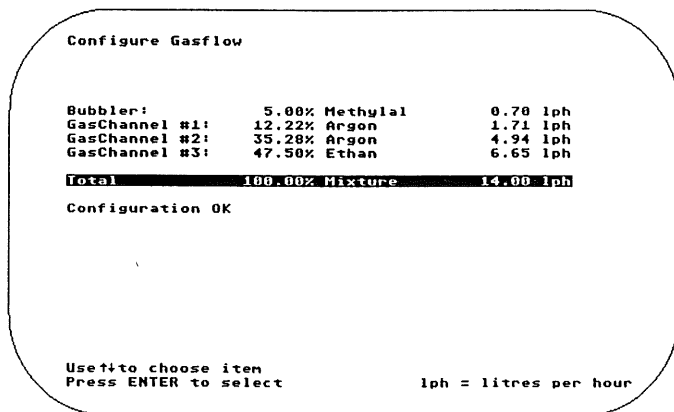


Fig.28 Konfiguration des Gesamtflusses

schirm eine Warnung. Eine Fehlermeldung erscheint, falls Gasflüsse errechnet werden, die einer Eingangsspannung V_{in} von weniger als 10 mV entsprechen. Ein so kleiner Fluss kann nicht mehr kontrolliert werden. Flüsse die grösser sind als der maximal mögliche Fluss, ergeben ebenfalls eine Fehlermeldung.

In diesem Menüpunkt soll nun die Gasmischung konfiguriert werden. Das Programm nimmt dem Benutzer dabei so viel Arbeit wie möglich ab.

Die Summe der einzelnen Komponenten beträgt stets 100%, d.h. der letzte Gaskanal wird automatisch auf 100% ergänzt falls mit dem Durchflusswascher gearbeitet wird, so bestimmt der

Bis anhin wurde nur die Gasmischung in % eingegeben. Der Gesamtfluss ergibt nun die absoluten Gasflüsse jeder einzelnen Komponente. Dabei muss natürlich die Spezifikation der Massenflussregler berücksichtigt werden.

Werden Gasflüsse errechnet, die kleiner als 1.5% des maximal möglichen Flusses sind, so erscheint auf dem Bild-

3.8 Eichen der Massenflussregler

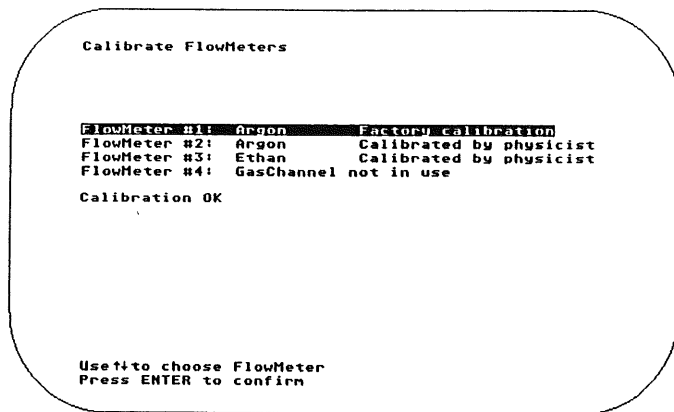


Fig.29 Eichen der Flussregler I

gültige ist. Mit den Pfeiltasten kann nun jeder Kanal angewählt werden. Mit ENTER gelangt man in das Eichmenu für den angewählten Kanal. Hier hat man die Auswahl zwischen fünf weiteren Untermenüs, wobei das erste (*Calibrate FlowMeter #i for Gas*) das eigentliche Eichmenu ist.

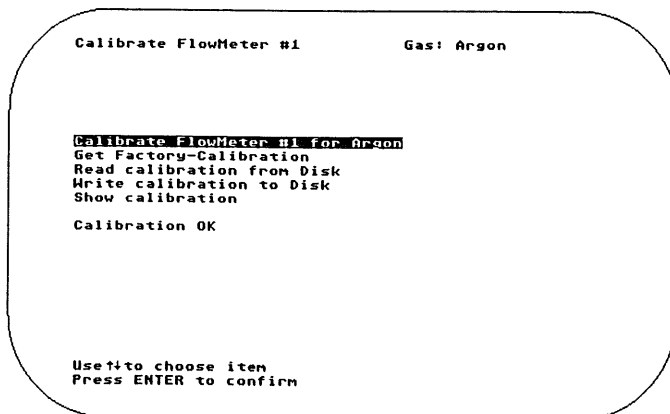


Fig.30 Eichen der Flussregler II

den CALIBRA1.DAT bis CALIBRA4.DAT Files.

Im letzten Untermenü, das aufgerufen werden kann (*Show calibration*), wird das Eichprotokoll graphisch dargestellt (s.Fig.31). Wie bei den Eichprotokollen in Kapitel 1.6 (s.Fig.11-14) ist der gemessene Fluss gegen die Eingangsspannung aufgetragen.

Da die Massenflussregler nicht immer das vom Hersteller angegebene Verhalten zeigen, empfiehlt es sich, jeden Kanal einzeln zu eichen.

Durch Aufrufen von *Calibrate FlowMeters* erscheint auf dem Bildschirm von jedem Kanal, ob er von einem Physiker geeicht wurde, oder ob die Eichung des Herstellers die aktuell

Durch Aufrufen des zweiten Menüpunkts (*Get Factory Calibration*) wird die Eichkurve des Herstellers übernommen.

Die nächsten beiden Menüpunkte (*Read/Write calibration from/to Disk*) beziehen sich auf das Speichern und Lesen von Eichprotokollen. Die Eichprotokolle befinden sich, sofern sie existieren, in

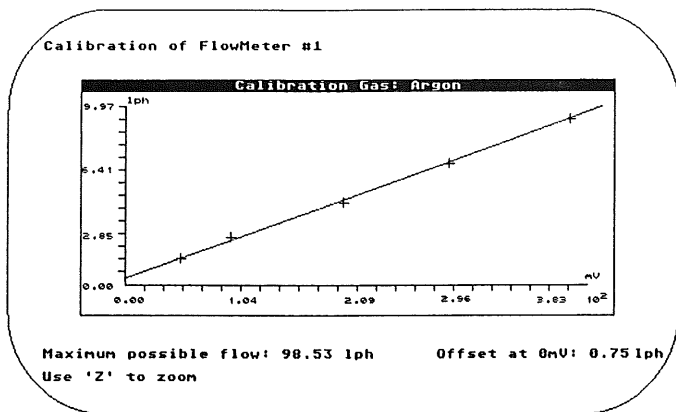


Fig.31 Eichen der Flussregler III

Drücken von 'Z' wird die Skala so geändert, dass sie dem Eichprotokoll angepasst wird. Die Skala reicht nun von 0 mV bis zum 1.1-fachen der grössten Eingangsspannung. Analog gilt für die Skala der Ordinate 0 lph bis zum 1.1-fachen des grössten gemessenen Flusses. Nochmaliges Drücken von 'Z' bewirkt, dass wieder die Grundeinstellung erscheint.

Um die Flussregler zu eichen, genügt es, das oberste Menu aufzurufen (s.Fig.30). Dabei werden automatisch die Magnetventile so geschaltet,

Calibration of FlowMeter #1 Gas: Argon

1	50mV	1.65 lph
2	100mV	2.82 lph
3	200mV	4.62 lph
4	300mV	6.64 lph

Press F1 for help

Fig.32 Eichen der Flussregler IV

das die Kammer vom Gas-system entkoppelt wird. Falls schon ein Eichprotokoll mit *Read calibration from disk* geladen wurde, erscheint dies als Tabelle auf dem Bildschirm. Mit F1 kann nun ein Hilfs-menu aufgerufen werden, in dem steht, mit welchen Tasten die Eichung vorgenommen werden kann. Mit 'S' kann der nächste Eichpunkt gemessen werden. Mit 'Alt-E' kann ein beliebiger Messpunkt aus der Eich-tabelle gelöscht werden. Mit ESC wird das Eichuntermenu verlassen, ohne dass eine Eichung vorgenommen wurde. Mit 'E' wird

Unter der Graphik ist der maximal mögliche Fluss und der kleinstmögliche Fluss angegeben. Maximal möglich bedeutet: der erwartete Fluss bei einer Eingangsspannung von 5000 mV. In der Grundeinstellung sind die Achsen so beschriftet, dass die Spannung von 0-5000 mV und der Fluss von 0- Φ_{Max} angegeben sind. Durch

Drücken von 'Z' wird die Skala so geändert, dass sie dem Eichprotokoll angepasst wird. Die Skala reicht nun von 0 mV bis zum 1.1-fachen der grössten Eingangsspannung. Analog gilt für die Skala der Ordinate 0 lph bis zum 1.1-fachen des grössten gemessenen Flusses. Nochmaliges Drücken von 'Z' bewirkt, dass wieder die Grundeinstellung erscheint.

Um die Flussregler zu eichen, genügt es, das oberste Menu aufzurufen (s.Fig.30). Dabei werden automatisch die Magnetventile so geschaltet,

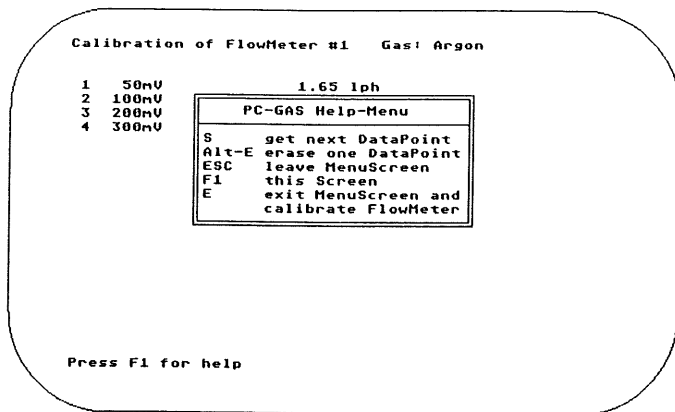


Fig.33 Eichen der Flussregler V

aufgefordert, die Sollspannung einzugeben. Die gemessene Ausgangsspannung wird direkt darunter angegeben. Falls die Ausgangsspannung zu stark flimmert,

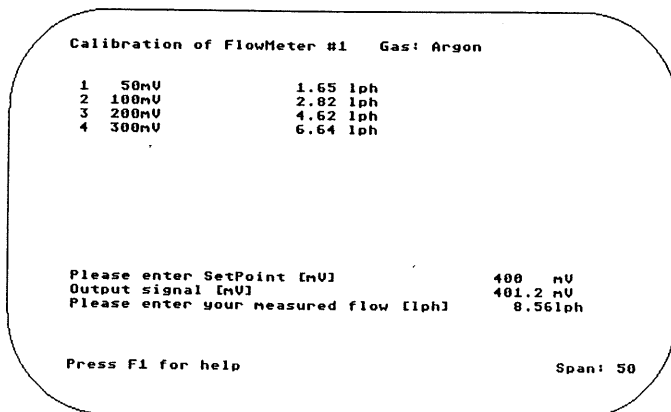


Fig.34 Eichen der Flussregler VI

warten, bis die Ausgangsspannung gleich der Eingangsspannung ist, dies dauert meistens etwa 30 Sekunden.

Nach Drücken von ENTER kann der gemessene Fluss eingegeben werden. Dieser Eichpunkt wird ins Eichprotokoll übernommen.

das Eichuntermenu regulär verlassen, d.h. es wird eine Gerade durch die Eichpunkte gelegt und die Werte Φ_{Max} und Φ_{Null} werden berechnet. Falls keine Gerade durch die Punkte gelegt werden kann (z.B. nur ein Eichpunkt), so wird automatisch die Eichung des Herstellers eingestellt. Nachdem 'S' gedrückt wurde, wird man aufgefordert, die Sollspannung einzugeben. Die gemessene Ausgangsspannung wird direkt darunter angegeben. Falls die Ausgangsspannung zu stark flimmert, kann dies mit den Tasten '+' und '-' verringert werden. D.h. es wird über so viele Messungen, wie in der Variablen 'Span' angegeben ist, der Mittelwert gebildet. Dieser Mittelwert wird auf die nächste ganze Zahl gerundet, welche nun in Millivolt umgerechnet wird.

Man muss mit der eigentlichen Messung solange

3.9 Speichern der Gasparameter

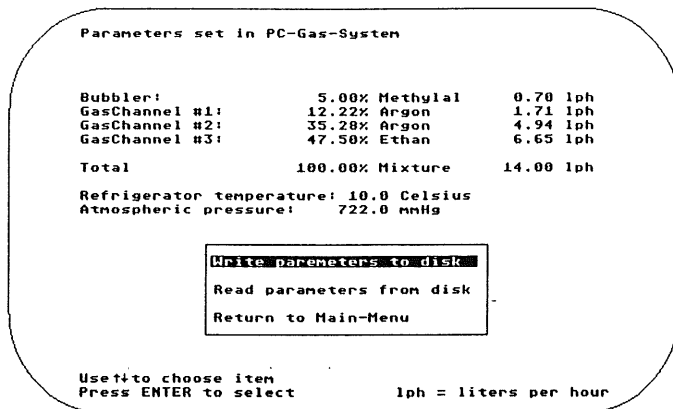


Fig.35 Speichern der Gasparameter

Da die Konfiguration des Gassystems recht umfangreich ist, besteht die Möglichkeit, die Gasparameter zu speichern. Im Untermenü *Read/Write Gas-parameters* sind alle aktuell konfigurierten Parameter aufgelistet. Diese können nun mit *Write parameters to disk* im File PARAMETER gespeichert werden. Mit *Read parameter from disk*

können die gespeicherten Daten wieder gelesen werden. Neben den sichtbaren Parametern wird auch die Eichkurve gespeichert. In PARAMETER werden allerdings nur Φ_{Max} und Φ_{Null} gespeichert, das vollständige Eichprotokoll findet sich in den CALIBRA1.DAT bis CALIBRA4.DAT Files.

3.10 Starten des Flusses

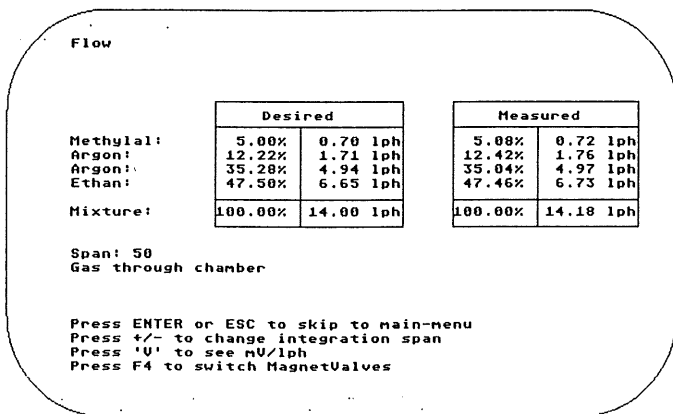


Fig.36 Starten

Mit *Start Flow* wird das Gassystem in Betrieb genommen. Alle Gasparameter, die konfiguriert wurden, sind in diesem Menü auf dem Bildschirm sichtbar. In je einer Tabelle sind die gewünschten und die gemessenen Werte sichtbar. Um zu überprüfen, ob die Eichung richtig übernommen wurde, kann durch Drücken von 'V' die Spannungen in Millivolt anstelle

der Flüsse in Liter pro Stunde auf dem Bildschirm sichtbar machen. Nochmaliges Drücken von 'V' bewirkt, dass wieder die alte Darstellung

aktiv wird. Mit '+' und '-' wird wie im Eichuntermenu die Mittelwertbildung beeinflusst. Mit F4 können die Magnetventile geschaltet werden. Nach dem Aufrufen von *Start Flow* werden diese so gestellt, dass das Gas durch die Kammer fließt. Die Meldung *Gas through chamber* auf dem Bildschirm zeigt dies an. Nach Drücken von F4 erscheint an dieser Stelle *Gas through bypass*.

Mit ENTER oder ESC gelangt man wieder in das Hauptmenu zurück, wobei der Gasfluss nicht beeinflusst wird. So kann z.B. der Gasfluss neu konfiguriert werden, ohne dass dies einen Einfluss hat. Erst wenn *Start Flow* aufgerufen wird, wird der neue Gasfluss auch eingestellt.

3.11 Stoppen

Mit *Stop Flow* wird eine Sollspannung von 0 mV geschrieben. Im Hauptmenu erscheint unten rechts die Meldung *No Flow*. Dass tatsächlich kein Fluss mehr fließt, ist anhand der Schwebekörperflussmesser erkennbar, die Schwebekörper sinken langsam auf die Nullmarke zu.

3.12 Verlassen des Programms

Mit *Exit to DOS* wird eine Sollspannung von 0 mV geschrieben, die Magnetventile werden geöffnet, d.h. sie werden so geschaltet, dass das Gas durch die Kammer fließen würde. Weiter wird der Bildschirm gelöscht und die Graphik ausgeschaltet. Auf dem Bildschirm erscheint oben links der gewohnte DOS-Prompt.

4. Experimenteller Teil

4.1 Messidee

Mit dem neuen Gassystem wurden an einer Proportional-kammer verschiedene Gasmischungen getestet. Dabei sollten Plateaukurven verschiedener Gasmischungen miteinander verglichen werden.

Für eine Plateaukurve wird die Effizienz der Kammer gegenüber der angelegten Hochspannung aufgetragen. Um die Effizienz der Kammer zu messen, muss mit einem zweiten Detektor überprüft werden, ob ein Teilchen durch die Proportional-kammer geflogen ist. Der zweite Detektor besteht hier aus zwei Photovervielfachern, welche die β^- -Strahlung einer Ru^{106} -Quelle messen. Die beiden Photovervielfacher sind dabei so angeordnet, dass jedesmal, wenn ein Elektron von beiden Photovervielfachern gemessen wurde, auch die Proportional-kammer dieses Elektron hätte sehen müssen. Das Verhältnis der Zählrate der Kammer in Koinzidenz mit beiden Photovervielfachern und der Zählrate der Koinzidenzen der Photovervielfacher ergibt die Effizienz der Kammer.

Da die Effizienz der Kammer gasabhängig ist, kann mit verschiedenen Plateaukurven der Einfluss der Gasmischung gemessen werden.

4.2 Versuchsaufbau

Neben dem Gassystem, der Proportional-kammer und den Photovervielfachern benötigt man zur Messung von Plateaukurven noch eine Auslese-elektronik für die Kammer. In der Hochenergiephysik ist dabei der sogenannte NIM-Standard üblich. NIM-Elektronik gibt es im Baukastenprinzip, d.h. Diskriminatoren, Inverter, Koinzidenzen, Verzögerer, Zähler usw. sind als Einschübe erhältlich, welche nach Bedarf zusammengesteckt werden können.

Die Proportional-kammer ist ein Prototyp der zentralen inneren Proportional-kammer des H1-Detektors bei HERA in Hamburg.

Die Parameter dieser Kammer sind:

totale Länge:	2470 mm
aktive Länge:	2190 mm
Radius der Anodendrähte:	157 mm

Durchmesser eines Anodendrahts:	25 μm
Anzahl Anodendrähte:	480
Abstand zwischen den Anodendrähten:	2 mm
Abstand von Anode zu Kathode:	3 mm
Kathodenpadgrösse:	36 mm (Δz) \times 124 mm ($r\Delta\Phi$)
Anzahl Kathodenpads:	480
Anzahl Vorverstärker:	480

Für weitere Details siehe [7] [8] [9].

Das Besondere an dieser Proportionalkammer ist, dass nicht die Anodendrähte ausgelesen werden, sondern die auf die Kathodenpads induzierten Signale; man erhält so eine zusätzliche Ortsinformation.

Weil die Ortsinformation durch die Ru-Quelle gegeben war, wurde bei unserem Testaufbau nur ein Kathodenpad ausgelesen.

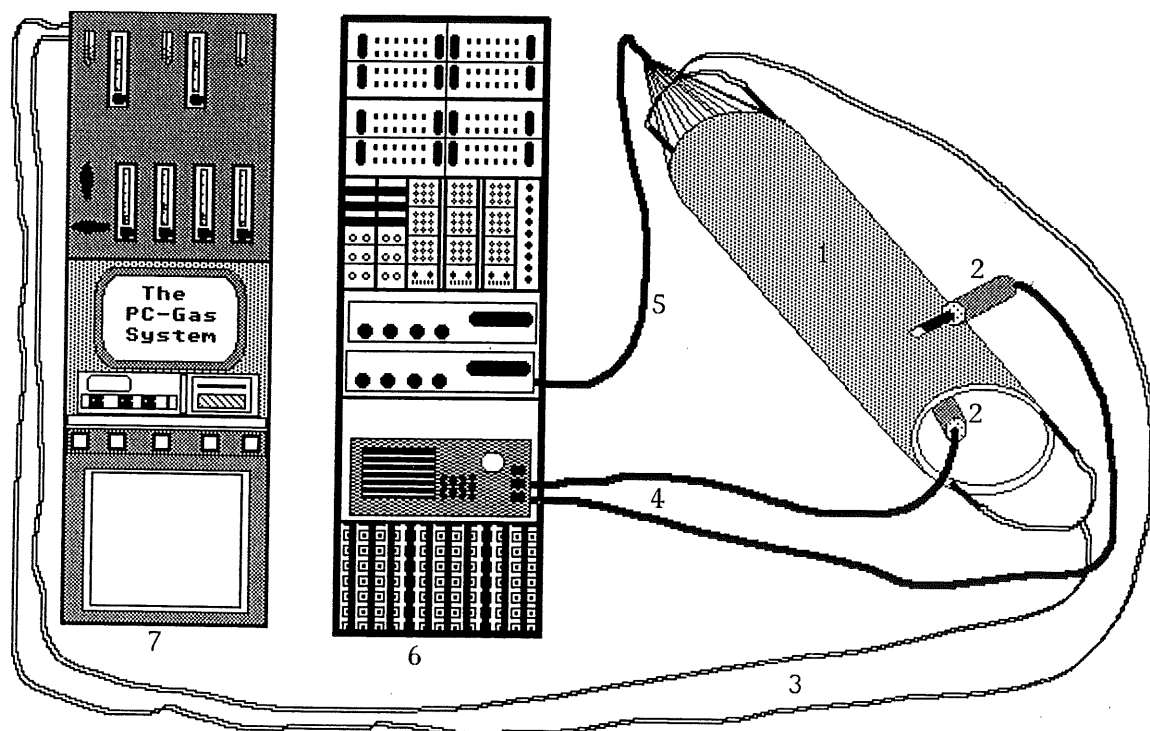


Fig.37 Versuchsaufbau

- 1 Proportionalkammer
- 2 Photovervielfacher

- 3 Gasleitung
- 4 Hochspannungskabel für Photovervielfacher
- 5 Hochspannungskabel für Proportionalkammer
- 6 Rack mit NIM-Elektronik
- 7 Gassystem

Das Gassystem spült die ganze Zeit Gas durch die Kammer. Eine Faustregel besagt dabei, dass der Gasfluss so gewählt werden sollte, dass die Kammer alle 2-3 Stunden mit neuem Gas gefüllt sein sollte. Bei einem Volumen von ca 20 Litern ergibt dies einen Gesamtfluss von 7-10 lph. Bei gewissen Mischungen, werden bei so kleinem Gesamtfluss die einzelnen Anteile so klein, dass die Eingangsspannungen für die elektronischen Massenflussregler deutlich unter 50 mV liegen. In diesem Bereich ist die Messgenauigkeit nicht genügend gut.

Um nicht zuviel Gas zu verschwenden, habe ich den jeweils kleinsten Teilfluss auf ca 50 mV eingestellt¹⁾.

Die Photovervielfacher arbeiten bei einer Betriebsspannung von 1800 V. Die Kammer arbeitet ca. 2500 V (je nach Gasmischung) am besten. Gleichzeitig muss auch der Strom, der durch die Kammer fließt, gemessen werden. Im Normalbetrieb fließt kein Strom ($I < 0.1 \mu\text{A}$), sobald aber der Strom mit der angelegten Hochspannung zu steigen beginnt, zeigt dies das Ende des Plateaus an. Wenn die Hochspannung noch höher steigt, können Durchschläge entstehen, kurzzeitig treten sehr hohe Ströme auf; dabei können Anodendrähte reißen.

Die Photovervielfachersignale Sz1 und Sz2 passieren Diskriminatoren, deren Schwelle so eingestellt ist, dass Rauschen unterdrückt wird. Die logischen Ausgangssignale der Diskriminatoren werden geeignet verzögert und in Koinzidenz geschaltet.

Die Signale der Kammer werden erst elektronisch aufbereitet, bevor sie in einem Diskriminator in logische Pulse umgewandelt werden. Die Signale werden in einem Vorverstärker vergrößert, in einer 'Shaper-Box' geglättet und schliesslich invertiert, sodass ein für den Diskriminator gut erkennbares Signal entsteht.

1) Es besteht die Möglichkeit, die Massenflussregler durch Auswechseln der Messbereichseinsätze umeichen zu lassen.

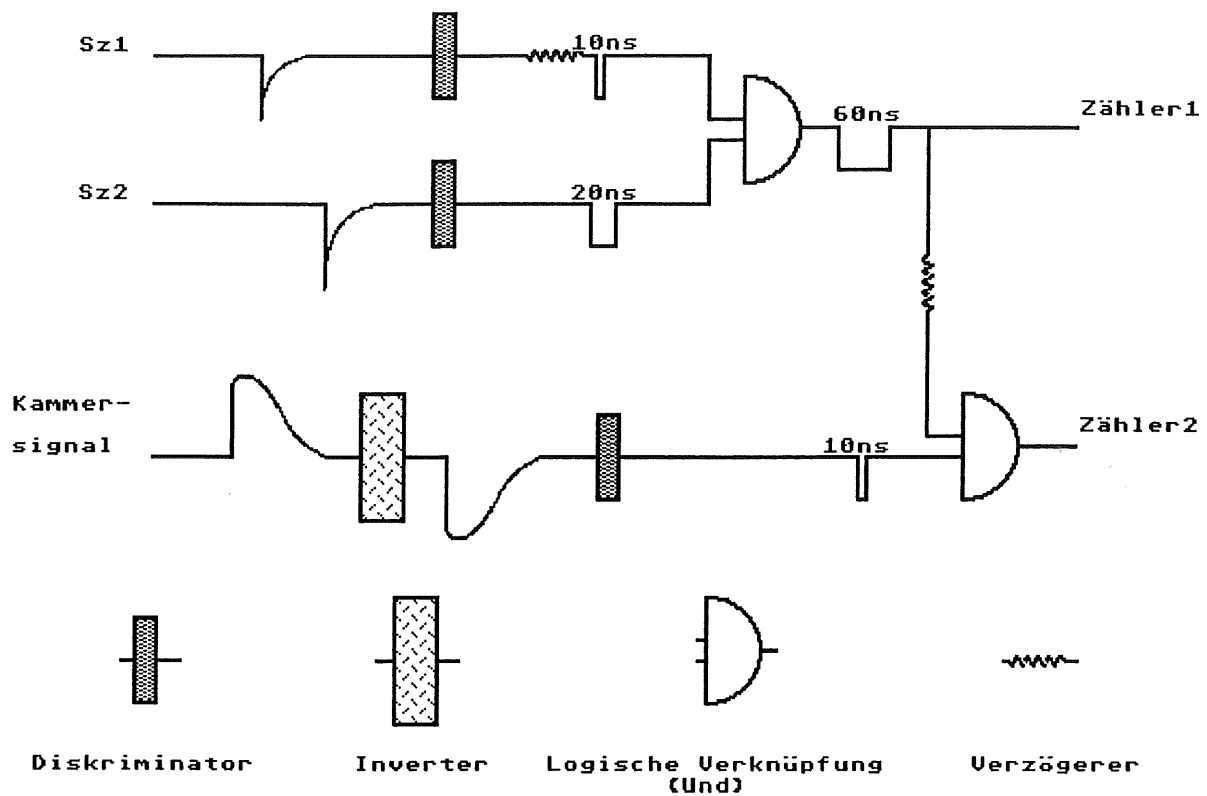


Fig.38 Das Schaltschema

Nachdem der Aufbau so realisiert war, gestaltete sich eine Messung recht einfach. Die Hochspannung für die Kammer musste eingestellt werden, worauf die Zähler 1 und 2 gestartet werden mussten. Innert 10 Minuten hatten die Photovervielfacher 100'000 β^- detektiert, was einer Rate von ca 160 Hz entspricht.

Der relative statistische Fehler r_ε der Effizienz ε ist durch die Kehrwerte der detektierten β^- gegeben:

$$r_\varepsilon^2 = \frac{1}{N_2} - \frac{1}{N_1} \quad (4.2.1)$$

Die zufälligen Koinzidenzen ergeben einen Fehler von ca 0.2%, ich berücksichtige sie deshalb nicht.

Es ist also möglich innert 1 $\frac{1}{2}$ Stunden eine Plateaumessung durchzuführen. Nachher muss eine neue Gasmischung, allerdings mindestens ei-

nen Tag lang durch die Kammer geflossen sein, bis eine neue Plateaukurve aufgenommen werden kann.

Bevor ich nun zu den Resultaten komme, möchte ich noch etwas über die Funktionsweise einer Proportionalkammer sagen. Ohne dies ist auch ein qualitatives Verständnis der Verschiedenheit der einzelnen Plateaukurven nicht möglich.

4.3 Funktionsweise einer Proportionalkammer

Ein elektromagnetisch wechselwirkendes Teilchen, das durch Materie fliegt, verliert auf seinem Weg Energie. Nach Bethe-Bloch kann dieser Energieverlust folgendermassen beschrieben werden [10] [11]:

$$\frac{dE}{dX} = -K \frac{Z}{A} \frac{\rho}{\beta^2} \left\{ \ln \frac{2mc^2 \beta^2 E_M}{I^2 (1-\beta^2)} - 2\beta^2 \right\}, \quad K = \frac{2\pi N z^2 e^4}{mc^2} \quad (4.3.1)$$

dabei ist:

N	Avogadro'sche Zahl
m,e	Masse und Ladung des Elektrons
Z,A	Atomnummer und -masse
ρ	Dichte der Materie
I	effektives Ionisationspotential
z, β	Ladung und Geschwindigkeit des Teilchens
E_M	maximal möglicher Energieübertrag pro Wechselwirkung

E_M lässt sich mit Hilfe der Energie- und Impulserhaltung berechnen:

$$E_M = \frac{2mc^2}{1-\beta^2} \quad (4.3.2)$$

Häufig wird die Länge X durch die reduzierte Länge x ersetzt, wobei x definiert ist als:

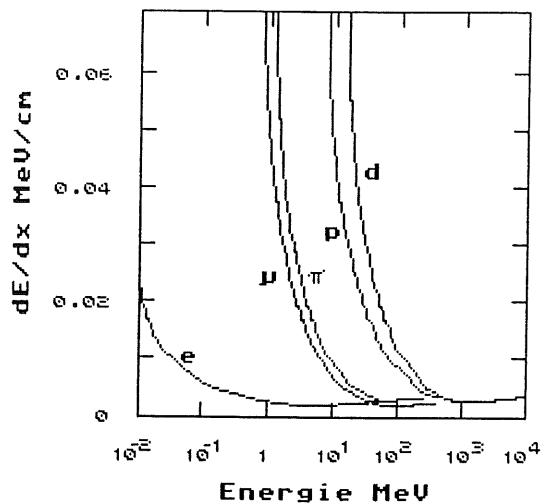
$$x = \rho X \quad (4.3.3)$$

somit ergibt sich:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dX} \quad (4.3.4)$$

Alle Angaben in diesem Abschnitt inklusive Tabellen und Bilder stammen aus:

F. Sauli
Principles of Operation of Multiwire, Proportional and Drift Chambers
CERN Report 77-09 (1977)



Betrachtet man die Energieverlustsfunktion dE/dx als Funktion der Energie E (s.Fig.39), so stellt man fest, dass bei Energien oberhalb einiger MeV alle Teilchen gleichviel Energie pro Einheitslänge verlieren. Da die Energieverlustsfunktion dort ein Minimum annimmt, spricht man von minimal ionisierenden Teilchen. Bei sehr hohen Energien steigt die Energieverlustsfunktion wieder an (relativistischer Anstieg), dieser Effekt spielt hier allerdings keine Rolle.

Fig.39 Energieverlustsfunktion

Die nachfolgende Tabelle (s.Fig.40) zeigt für eine Auswahl von Gasen bei Normdruck den Energieverlust für minimal ionisierende Teilchen.

Gas	Z	A	I_0 eV	W_i eV	dE/dx		n_p IP/cm	n_T IP/cm
					MeV/g cm^{-2}	keV/cm		
H ₂	2	2	15.4	37	4.03	0.34	5.2	9.2
He	2	4	24.6	41	1.94	0.32	5.9	7.8
N ₂	14	28	15.5	35	1.68	1.96	(10)	56
O ₂	16	32	12.2	31	1.69	2.26	22	73
Ne	10	20.2	21.6	36	1.68	1.41	12	39
Ar	18	39.9	15.8	26	1.47	2.44	29.4	94
Kr	36	83.8	14.0	24	1.32	4.60	(22)	192
Xe	54	131.3	12.1	22	1.23	6.76	44	307
CO ₂	22	44	13.7	33	1.62	3.01	(34)	91
CH ₄	10	16	13.1	28	2.21	1.48	16	53
C ₄ H ₁₀	34	58	10.8	23	1.86	4.50	(46)	195

Fig.40 Ionisationspotential, Energieverlust und Ionenpaare pro Einheitslänge für verschiedene Gase bei Normdruck.

Um das effektive Ionisationspotential I aus obiger Tabelle zu erhalten, genügt es, I_0 mit Z zu multiplizieren.

$$I = I_0 Z \quad (4.3.5)$$

W_i ist die mittlere Energie, die benötigt wird, um ein Ionenpaar (IP) zu erzeugen. Ein minimal ionisierendes Teilchen, das die Energie ΔE im Gas deponiert, produziert somit

$$n_T = \frac{\Delta E}{W_i} \quad (4.3.6)$$

Ionenpaare. Davon sind n_p Ionenpaare primär erzeugt worden, die übrigen entstanden durch sekundäre Ionisation.

Falls mit einem Gasmisch (z.B. Argon/Isobutan 70/30) gearbeitet wird, so können die dort produzierten Ionenpaare folgendermassen abgeschätzt werden:

$$n_T = 0.7n_{T_{\text{Argon}}} + 0.3n_{T_{\text{Isobutan}}} \quad (4.3.7)$$

Die so produzierten Ionenpaare (Restatom + Elektron) driften nun entlang den Feldlinien eines angelegten elektrischen Feldes. Die positiven Ionen bewegen sich ihrer grossen Masse wegen nur langsam zur Kathode, die Elektronen dagegen werden beschleunigt und erzeugen, falls sie zwischen zwei Stössen an Gasatomen genügend Energie gewinnen, weitere Ionenpaare; es entsteht eine Lawine (s. Fig 41).

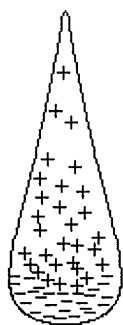


Fig.41 Lawine

Fig.41 zeigt eine Aufnahme einer Nebelkammer, wo der Nebel um die Ionen herum kondensierte. Die schnellen Elektronen bilden die Front, die langsamen positiven Ionen bleiben zurück; es entsteht ein tropfenförmiges Gebilde.

Die Anzahl Ionenpaare, die ein Elektron pro Driftstrecke produziert, nennt man den ersten Townsend-Koeffizient α . α hängt vom elektrischen Feld, vom Gas und vom Gasdruck ab.

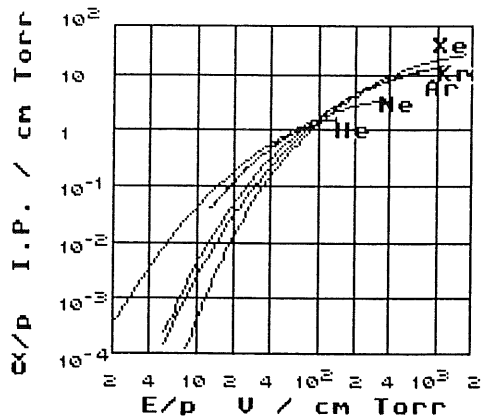


Fig.42 zeigt den reduzierten ersten Townsend-Koeffizienten α/p (p = Gasdruck) als Funktion des reduzierten elektrischen Feldes E/p für Edelgase. Deutlich ist zu erkennen, dass der erste Townsend-Koeffizient über viele Zehnerpotenzen variiert.

Fig.42 Der erste Townsend-Koeffizient

Ist der erste Townsend-Koeffizient bekannt, so kann mit ihm die Gasverstärkung berechnet werden.

Sei n die Anzahl der Elektronen an einer bestimmten Stelle, so erhöht sich nach einer Driftstrecke dx die Anzahl um dn .

$$dn = n \alpha dx \quad (4.3.8)$$

Durch Integration erhält man:

$$n = n_0 e^{\alpha x} \quad (4.3.9)$$

Die Gasverstärkung M wird somit:

$$M = \frac{n}{n_0} = e^{\alpha x} \quad (4.3.10)$$

Falls das elektrische Feld nicht homogen ist, wird aus (4.3.10):

$$M = \exp \left\{ \int_{x_1}^{x_2} \alpha(x) dx \right\} \quad (4.3.11)$$

Die Gasverstärkung M kann allerdings nicht nach Belieben erhöht werden, da weitere Prozesse dies verhindern.

- Gasatome werden nicht nur ionisiert, sie werden auch durch Stöße angeregt. Edelgase können dann nur durch Emission eines Photons wieder in den Grundzustand gelangen. Diese Photonen bewegen sich ungeachtet des elektrischen Feldes durch das ganze Gasvolumen, bis sie irgendwo, durch Photo-

effekt an den Wänden weitere Lawinen produzieren. Die dabei freigesetzte Ladungsmenge ist unabhängig von der Primärionisation.

- Eine grosse Lawine schirmt durch die eigene Ladungsverteilung das angelegte elektrische Feld ab.
- Eine zu grosse Lawine mit zu vielen freien Ladungsträgern führt zu Durchschlägen, welche die Kammer beschädigen können.

In der Praxis können Gasverstärkungen für Proportionalkammern bis $M = 10^7$ erreicht werden.

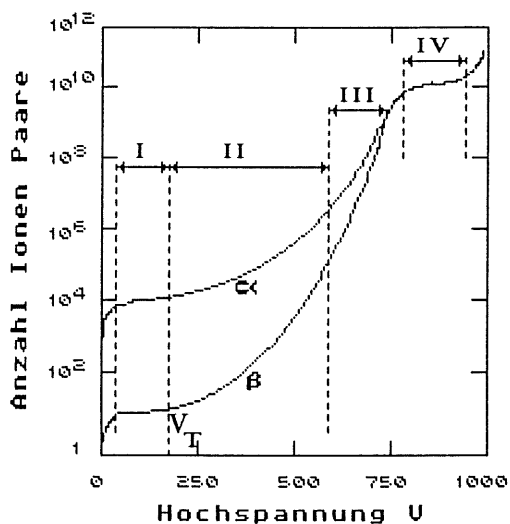


Fig.43 Gasverstärkung

Fig.43 zeigt die Zahl der erzeugten Ionenpaare beim Durchgang eines α bzw. β Teilchens gegenüber der angelegten Hochspannung. Bei sehr kleinen Spannungen rekombinieren die Ionenpaare bevor sie detektiert werden können. Bei kleinen Spannungen ($V \sim V_T$, $V_T =$ Schwellenspannung für Ionisation) findet noch keine Sekundärionisation statt, trotzdem erreichen die Elektronen die Anode, wo sie ein Signal erzeugen. Dies ist der Bereich, in dem Ionisationskammern arbeiten (Bereich I).

Im Bereich II findet Gasverstärkung so statt, dass die Zahl der Ionenpaare, die auf Anode und Kathode gesammelt werden, proportional zur Primärionisation des durchfliegenden Teilchens ist. In diesem Bereich arbeiten Proportionalkammern. Wird die Spannung erhöht, wird die Ionisation unabhängig von der Primärionisation. Man spricht hier vom Bereich begrenzter Proportionalität (Bereich III).

Bei ganz hohen Spannungen (Bereich IV) breiten sich Ionenpaare über das ganze Gasvolumen aus. Die freigesetzte Ladungsmenge hängt nur noch von der Kapazität des Zählers ab. Zähler dieser Art nennt man Geiger-Müller-Zähler.

Eine Proportionalzählkammer kann durch geeignete Wahl der Gasfüllung optimiert werden. Was man dabei erreichen möchte, sind in etwa folgende Kriterien:

- tiefe Arbeitsspannung
- hohe Gasverstärkung
- gute Proportionalität
- hohe Zählraten (kleine Totzeit)
- schnelle Detektierung
- lange Lebensdauer der Kammer

Edelgase zeigen bei tieferen Spannungen Lawinenbildung als komplexe Moleküle; da komplexe Moleküle sehr viele Anregungsmoden besitzen und somit keine weiteren Ionenpaare erzeugen. In der Tabelle (s. Fig. 40) ist zu erkennen, dass schwere Edelgase ein besseres Ionisationsvermögen haben als leichte. Da Xenon und Krypton sehr teuer sind, fällt die Wahl meistens auf Argon.

Argon alleine befriedigt jedoch obenstehende Kriterien noch lange nicht. Angeregte Argonatome fallen unter Emission eines 11.6 eV Photons in den Grundzustand zurück. Diese Photonen machen Photoeffekt an der Kathode (Schwellenenergie z.B. für Kupfer 7.7 eV), welcher neue Elektronen und somit neue Lawinen erzeugt. Die Gasverstärkung in reinem Argon beschränkt sich auf $M \approx 10^3 - 10^4$.

Zugabe von mehratomigen Gasen (häufig organischen Molekülen wie Methan, Ethan und Isobuthan oder auch Kohlendioxid, etc.) mit breiten Rotationsbanden soll diese Photonen strahlungslos absorbieren (Quenching).

Mischt man noch eine elektronegative Komponente dazu (häufig Freon), können auch die Elektronen, die durch Photoeffekt an der Kathode entstanden sind, absorbiert werden. Dazu muss die mittlere freie Weglänge für Elektroneneinfang an einem elektronegativen Molekül kleiner sein als die Distanz von Anode zu Kathode. Zu viele elektronegative Moleküle würden allerdings die gewünschte Lawinenbildung beeinträchtigen.

Da die grossen organischen Moleküle auch aufbrechen und die so entstehenden Molekülbruchstücke nicht unbedingt gasförmig sind, können Ablagerungen an Anode und Kathode entstehen. Um die Lebensdauer der Kammer zu verlängern, wird das Gas in der Kammer ständig erneuert. Häufig wird mit einem Lösungsmittel (meistens Methylal) versucht diese Ablagerungen aufzulösen und aus der Kammer herauszublasen.

Aufgrund dieser Überlegungen wird eine Gasmischung besonders häufig verwendet:

72.0%	Argon	} "magische" Mischung
23.5%	Isobutan	
0.5%	Freon	
4.0%	Methylal	

4.4 Messresultate

Neben der magischen Mischung habe ich den Einfluss von Freon und von Methylal in einem Argon/Ethan 50/50 Gemisch untersucht. In einer zweiten Messerie wird, anstelle von Methylal, Methanol(CH₄O) bzw. Wasser(H₂O) als Waschflüssigkeit verwendet. Am Schluss wird noch der CO₂-Anteil in einer Argon/CO₂ Mischung mit 0.2% Freon variiert.

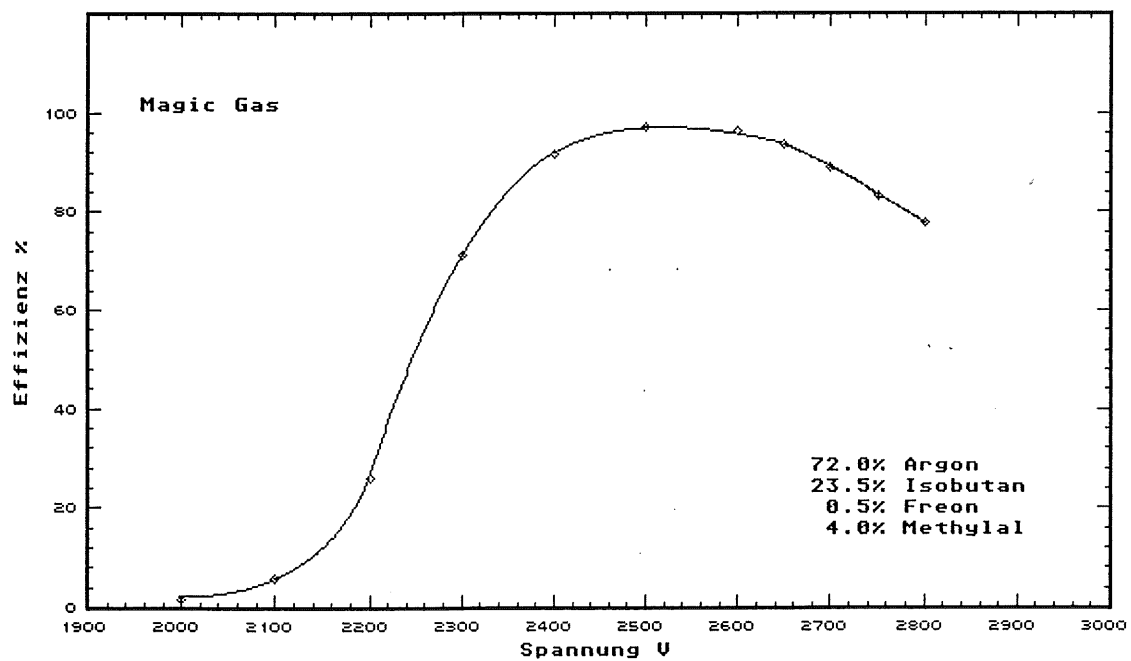


Fig.44 "magische" Mischung

In Fig.41 ist zu erkennen, dass die Schwellenspannung, bei der Gasverstärkung einsetzt, bei etwa 2000 V liegt. Bei 2550 V nimmt die Plateaukurve ein Maximum an, hier arbeitet die Kammer am effizientesten. Dass die Effizienz bei Spannungen über 2600 V drastisch abnimmt, muss an Totzeiteffekten liegen.

Falls dies tatsächlich so ist, kann die Totzeit τ mit Hilfe der Rate R der Kammersignale berechnet werden:

$$\eta = R\tau \quad (4.4.1)$$

Dabei ist η die Ineffizienz der Kammer.

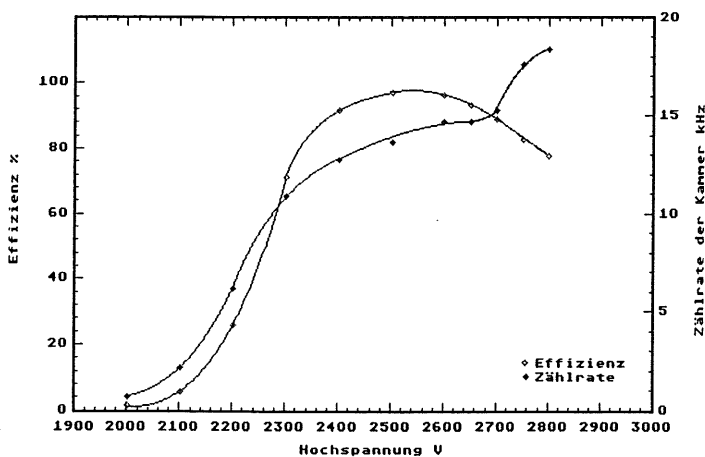


Fig.45 Zählrate der Kammer

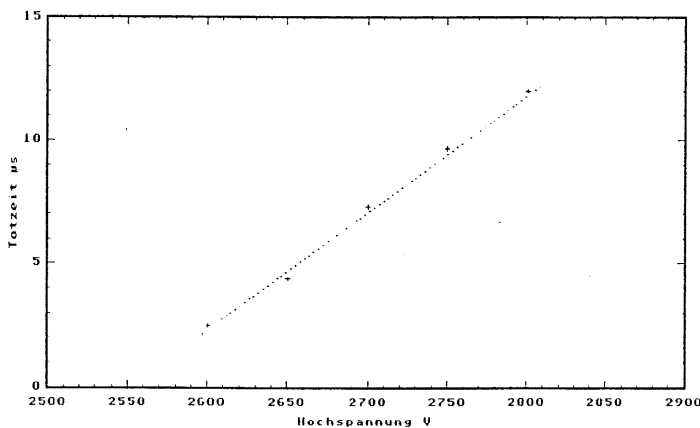


Fig.46 Totzeit

Die Einzelrate der Kammer wurde hier (s.Fig.45) in Funktion der angelegten Hochspannung gemessen. Deutlich ist zu erkennen, dass die Rate der Kammer mit der Effizienz ansteigt. Nachdem das Plateau erreicht ist, steigt die Rate stark an.

Die Formel zur Berechnung der Totzeit (4.4.1) darf natürlich erst verwendet werden, nachdem das Plateau erreicht wurde. Die so berechnete Totzeit wurde hier (s.Fig.46) in Funktion der Hochspannung aufgetragen. Die Totzeit nimmt linear mit der Hochspannung zu, wobei der Nulldurchgang bei etwa 2550 Volt liegt. Bei dieser Spannung ist die Effizienz der Kammer am grössten (s.Fig.44). Bei 2800 Volt beträgt die Totzeit 12 μ s.

Diese Totzeit ist die Folge der langen Driftzeit der Ionen in der Kammer:
Das zur Kathode senkrechte elektrische Feld, ist ab einer gewissen Entfernung vom Anodendraht [10]:

$$E = \frac{CV}{2\epsilon s} \quad (4.4.2)$$

mit: V angelegte Hochspannung
 ϵ Dielektrizitätskonstante ($\epsilon \approx 8.85 \text{ pF/m}$ für Gase)
s Abstand der Anodendrähte ($s = 2 \text{ mm}$)
C Kapazität pro Einheitslänge der Kammer

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{(\pi l/s) - \ln(2\pi a/s)} \quad (4.4.3)$$

mit: l Abstand vom Anodendraht zur Kathode ($l = 0.3 \text{ cm}$)
a Radius der Anodendrähte ($2a = 25 \text{ }\mu\text{m}$)

somit wird:

$$E \approx 1.98 * V \quad [\text{V/cm}] \quad (4.4.4)$$

Betrachtet man die Beweglichkeit μ von Isobutanionen in einem Argon/Isobutan 70/30 Gemisch, so gilt:

$$\mu = 1.06 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (4.4.5)$$

Die Driftgeschwindigkeit wird somit:

$$v_D = \mu E \approx 2.1 * V \quad [\text{cm/s}] \quad (4.4.6)$$

Bei einem Abstand von Anode zur Kathode von 0.3 cm und einer Spannung von $V = 2700 \text{ Volt}$ ergibt dies eine Driftzeit t_D von:

$$t_D \approx 53 \text{ }\mu\text{s} \quad (4.4.7)$$

Im Normalbetrieb einer Proportionalkammer ist es unerwünscht, dass die langsamen Ionen ein messbares Signal erzeugen, deshalb wird die Diskriminatorschwelle so hoch gestellt, dass nur die schnellen Elektronen, welche ein kurzes, hohes Signal erzeugen, gesehen werden. Wird nun durch die Gasverstärkung das Signal so stark vergrößert, dass auch das Signal der langsamen Ionen über die Diskriminatorschwelle gehoben wird, können Totzeiten von bis zu 53 μs entstehen.

Die zweite Messerie zeigt den Einfluss einer elektronegativen Komponente (Freon) in einem Argon/Ethan 50/50 Gemisch (s.Fig.47).

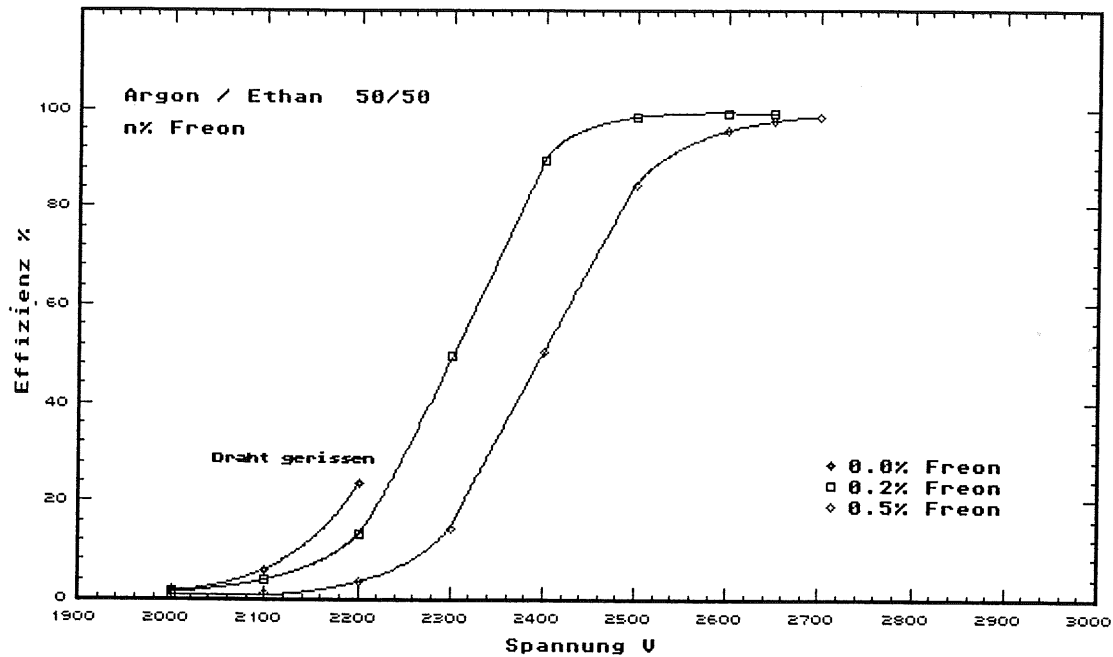


Fig.47 Argon/Ethan 50/50 + n% Freon

Ohne Freon-Anteil treten schon bei niedrigen Spannungen (≈ 2200 V) Durchschläge auf. Dadurch ist sogar ein Draht beschädigt worden. Bei einem Freon-Anteil von 0.2% steigt zwar die Plateaukurve flacher an, dafür erreicht man ein stabiles Plateau bei ca. 2400 V (90% Effizienz), bei 2650 V sind Durchschläge hörbar. Mit 0.5% Freon verschiebt sich das Plateau nochmals zu höheren Spannungen (2550 V - 2700 V). Ein Freon-Anteil von 0.2% scheint für diese Kammer vernünftig.

Bei einem konstanten Freon-Anteil von 0.2% in einem Argon/Ethan 50/50 Gemisch habe ich nun Methylal dazugegeben (s.Fig.48). Je mehr Methylal dazugemischt wurde, desto weiter verschob sich das Plateau nach rechts, gleichzeitig wird auch das Plateau länger. Normalerweise mischt man 5% Methylal bei, dies bedeutet somit, dass das Plateau bei 2460 V beginnt und bei 2850 V endet.

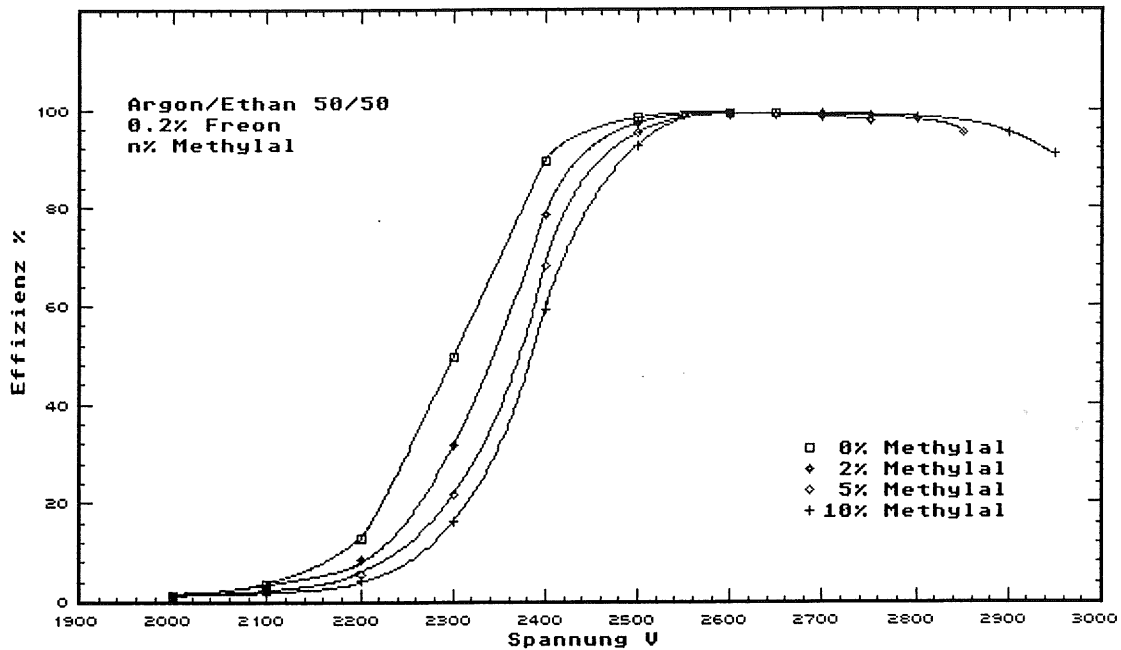


Fig.48 Argon/Ethane 50/50 + 0.2% Freon + n% Methylal

Weiter habe ich versucht, ob die Kammer auch ohne Freon benützt werden kann(s.Fig.49-52).

Es scheint, als ob es keine Rolle spielt, was für eine Flüssigkeit dem Argon/Ethane 50/50 Gemisch zugeführt wird. Sei dies nun Methylal, Methanol oder Wasser, jedesmal wird bei ca. 2400 V das Plateau erreicht; einzig die Länge das Plateaus ändert sich.

In einer letzten Messerie habe ich eine ganz neue Gasmischung getestet: Argon/Kohlendioxid + 0.2% Freon.

Zuerst versuchte ich Argon/Kohlendioxid ohne Freon auszumessen, dazu kam es aber nicht, da schon beim Spülen mit dieser Mischung bei einer Spannung von nur 2000 V ein Draht riss.

Mit Argon/Kohlendioxid 90/10 + 0.2% Freon beginnt die Gasverstärkung schon bei 1900 V, aber schon bei 2030 V, bei einer Effizienz von gut 60%, zieht die Kammer soviel Strom ($I > 15 \mu A$), dass es unmöglich ist, die Spannung weiter zu erhöhen. Bei Argon/Kohlendioxid 80/20 + 0.2% Freon herrscht dasselbe Problem, wobei die Spannung hier um 200 V höher ist.

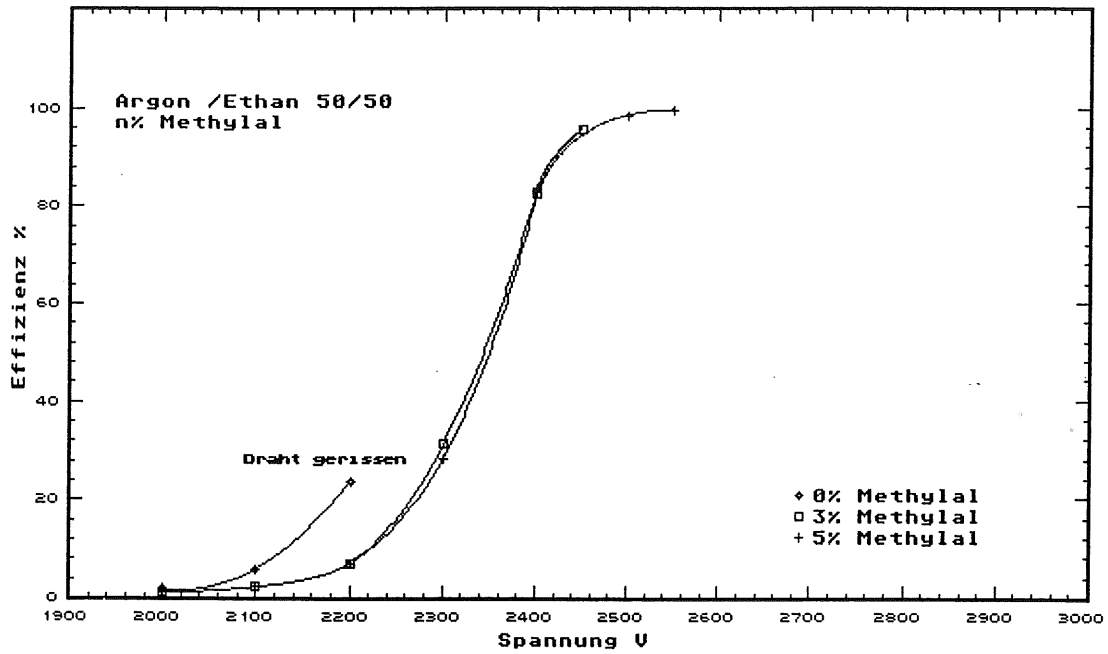


Fig.49 Argon/Ethan 50/50 + n% Methylal

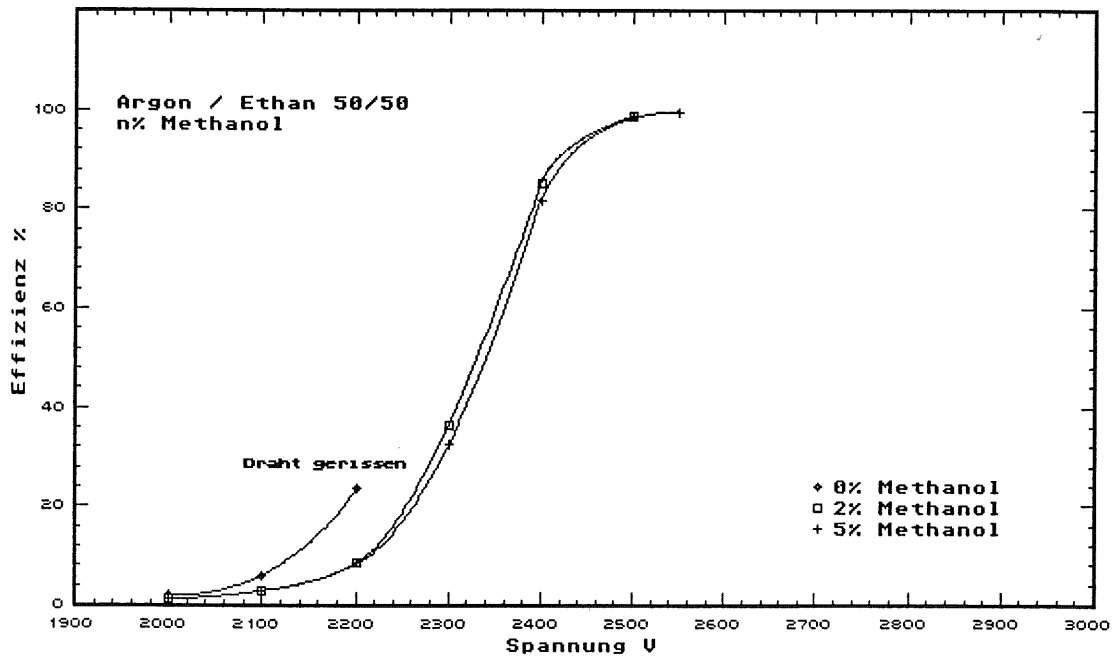


Fig.50 Argon/Ethan + n% Methanol

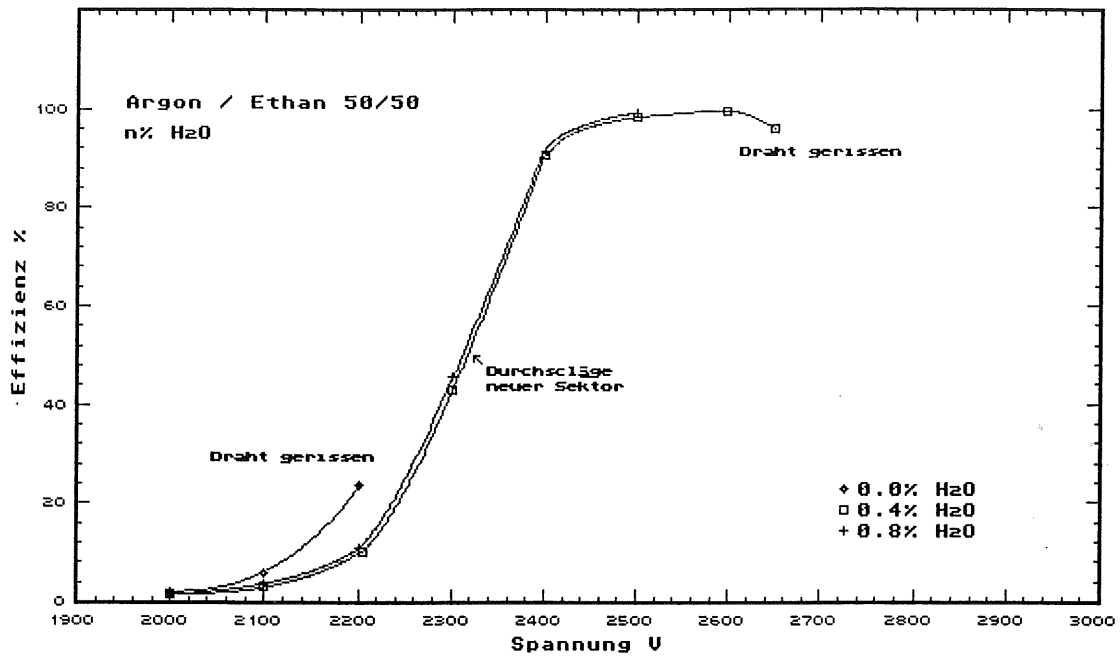


Fig.51 Argon/Ethan 50/50 + n% Wasser

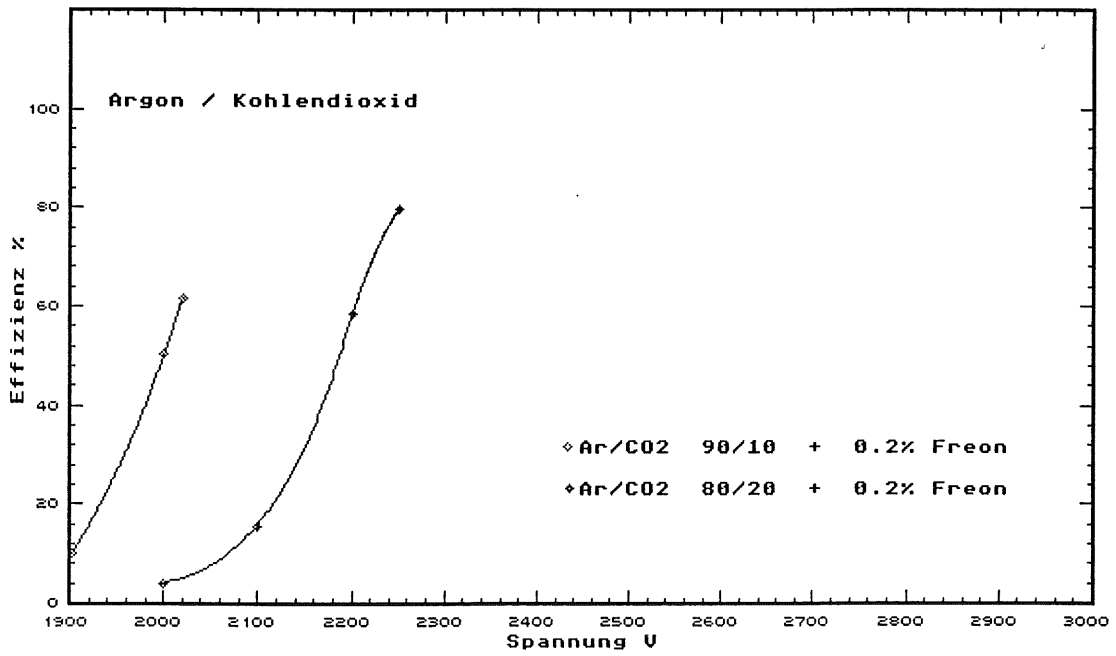


Fig.52 Argon/Kohlendioxid + 0.2% Freon

In einer Tabelle (s.Fig.53) habe ich nun die für die Plateaukurven signifikanten Daten zusammengefasst, dabei habe ich nur diejenigen Messungen berücksichtigt, bei denen auch tatsächlich ein Plateau zu messen war.

Gas	Effizienz		Ende des Plateaus [Volt]	Länge des Plateaus [Volt]
	10% [Volt]	90% [Volt]		
Magische Mischung	2140	2390	2800	410
Argon/Ethan 50/50				
0.2% Freon	2180	2400	2650	250
0.5% Freon	2280	2540	2700	160
Argon/Ethan 50/50 + 0.2% Freon				
2% Methylal	2220	2440	2750	310
5% Methylal	2250	2460	2850	390
10% Methylal	2280	2490	2950	460
Argon/Ethan 50/50				
3% Methylal	2220	2410	2500	90
5% Methylal	2220	2420	2550	130
Argon/Ethan 50/50				
2% Methanol	2220	2410	2500	90
5% Methanol	2220	2420	2550	130
Argon/Ethan 50/50				
0.4% Wasser	2210	2400	2650	250
0.8% Wasser	2210	2400	2500	100

Fig.53 Tabelle der Messresultate

In der Tabelle ist der Beginn der Gasverstärkung, der Anfang, das Ende und die Länge des Plateaus aufgetragen.

Um mit einer Kammer vernünftig arbeiten zu können, verlangt man eine Plateaulänge von mindestens 200 V. Es ist nun möglich unter obigen Gasmischungen diejenige auszusuchen, bei der die Kammer die längste Lebenserwartung hat und bei der die Totzeiteffekte am kleinsten sind. Ich würde mich dabei für ein Argon/Ethan 50/50+0.2% Freon+2-5% Methylal Gemisch entscheiden.

5. Schlussbemerkung

Die Gasmischanlage, so wie sie hier gebaut wurde, hat, wie die Messresultate zeigen, die Feuerprobe bestanden.

Es war zudem möglich zweimal identische Plateaukurven zu messen, einmal mit einem vorgemischtem Gas und einmal aus den einzelnen Komponenten mit der Gasmischanlage gemischtem Gas.

Die elektronischen Massenflussregler sind zu gross dimensioniert, sodass Mischungen mit mehreren Komponenten erst akzeptabel werden, wenn mit genügend grossen Gasflüssen gearbeitet wird.

Der Kühltisch arbeitet nach dem Absorberprinzip und erreicht kaum Temperaturen unter 10 °C, zudem schwankt die Temperatur um etwa ± 1 °C.

Das Computerprogramm arbeitet einwandfrei, allerdings gibt es manchmal Probleme beim Aufstarten. Meistens erscheint das Start-Signet beim ersten Mal, manchmal muss man jedoch zweimal probieren.

Alle Graphikroutinen, auf die das Programm zugreift, sind von Borlands-Graphic-Toolbox. Es scheint, als ob dort noch ein Programmfehler steckt, da es vorkommen kann, dass, wenn von einem Graphikbildschirm auf den anderen gewechselt wird, das Programm abstürzt. Da dies nur passieren kann, wenn gerade mit dem Programm gearbeitet wird, kann durch ein erneutes Aufstarten der Betrieb wieder aufgenommen werden. So ein "Absturz" hat erfreulicherweise keinen Einfluss auf die Kontinuität der Gasmischung; diese bleibt solange erhalten, wie der Computer eingeschaltet ist.

Anhang

A1	Das Computerprogramm	61
A2	Die Ruthenium-Quelle	64
A3	Eichprotokolle der elektronischen Massenflussregler	65
Literaturverzeichnis		69
Verdankung		70

At Das Computerprogramm

Das Computerprogramm ist in TURBO-PASCAL Ver.5.5 geschrieben. Der Quelltext erstreckt sich dabei über 6 Files, diese sind in folgendem Directory ersichtlich:

```
Volume in drive A is PCGAS
Directory of A:\SOURCE

.           «DIR»           9.08.90  15.00
..          «DIR»           9.08.90  15.00
GLOBAL     LIB           6765 18.08.90  9.07
SETUP      LIB           5565 16.07.90 14.25
AINAOUT    LIB          25946 24.08.90 12.08
SCREENS    LIB           31718 10.08.90 14.43
CONFIG     LIB           13972 16.07.90  8.41
PC-GAS     PAS           5597 18.08.90  9.08
          9 File(s)      13312 bytes free
```

Das Hauptprogramm ist dabei in PC-GAS.PAS zu finden. Im File GLOBAL.LIB werden alle globalen Variablen und Datenstrukturen definiert, weiter befindet sich die Grundkonfiguration für die Gasmischanlage in diesem File. SETUP.LIB enthält die beiden Initialisierungsroutinen für den Analog/Digitalwandler und für die Graphikpakete. AINAOUT.LIB enthält alle Routinen, welche direkt auf den Analog/Digitalwandler zugreifen. Die letzten beiden, SCREENS.LIB und CONFIG.LIB, enthalten alle Anweisungen für die Bildschirmdarstellung, die Steuerung der Pfeiltasten usw.

Falls jemand an diesem Programm weiterarbeiten möchte, ist es wichtig die Datenstruktur zu verstehen. Alle Daten, die nur gasspezifisch sind, sind in einem Record zusammengefasst. Ein weiterer Record enthält alle Daten, die mit den Massenflussreglern eine Einheit bilden. Schliesslich wird noch ein Record benötigt, der die flüssigkeitsspezifischen Daten beinhaltet.

Da die Gasmischanlage vier Kanäle hat, bilden 4 Records zusammen einen Array, somit sind in einem Array alle Informationen gespeichert, welche z.B. die vier Flussregler beschreiben.

Type

GasRec = Record

```
Gas      : String[46]; {Name of the Gas}
Symbol   : String[25]; {Chemical formula}
Convfact : REAL;      {Conversionfactor}
SpecHeat : REAL;      {Specific Heat}
Density  : REAL;      {
                        SpecHeat[i]*Density[i] }
End;      {Convfact = ----- }
                        {
                        SpecHeat[j]*Density[j] }
```

FlowRec = Record

```
MaxFlow  : Real;      {Calibrated Flow at 100% OutputSignal}
ZeroFlow : Real;      {Calibrated Flow at 0 mV}
SetFlow  : Real;      {Desired Flow}
DataFlow : Real;      {Measured Flow}
SetPoint  : 0..4095;  {4095 = 100% Flow ; 0 = No Flow}
DataPoint : Integer; {Measured 4095 = 100% Flow ;
                      2047 = No Flow}

Percentage : Real;    {Percentage of the component to
                      the mixed gas}
Calibrated : Boolean; {True = Recalibrated ;
                      False = FactoryCalibration}
```

End;

BubbleRec = Record

```
Fluid      : String[40]; {Name of the Fluid}
Symbol     : String[25]; {Chemical Formula}
A          : Real;
B          : Real;   {A , B , C : Antoine Constants}
C          : Real;
Temperature : Real; {Temperature in the refrigerator}
AirPressure : Real; {Atmospheric pressure}
FlowFactor  : Real; { BubbleFlux = Flux of GasChannel #1}
                        {
                        * FlowFactor }
Percentage  : Real; {Percentage of the Fluid to the mixed gas}
End;
```



```
GasType = Array[1..4] Of GasRec;  
FlowType = Array[1..4] Of FlowRec;
```

```
AnyText = String[40];
```

```
Const MaxFactoryFlow : Array[1..4] of Real = (96 , 96 , 96 , 96);
```

```
Var
```

```
Gas           : GasType;  
FlowMeter     : FlowType;  
Bubbler       : BubbleRec;  
GasChannel    : Integer;  
Bubble, Error : Boolean;  
Home,Flow     : Boolean;  
MagnetValves  : Boolean;  
Ch            : Char;  
MixtureFlow   : Real;
```

Falls einmal die Massenflussregler umgeeicht werden sollten, genügt es, den Konstantenvektor MaxFactoryFlow umzudefinieren.

Da der vollständige Ausdruck des Computerprogramms zu lang ist (fast 90 kBytes), ist er hier nicht aufgeführt. Der Ausdruck kann aber bei mir eingesehen werden.

A2 Die Ruthenium-Quelle

Um die Plateaukurven zu messen, habe ich mit einer Ru^{106} -Quelle gearbeitet. Ru^{106} zerfällt unter Emission eines β^- in Rhodium Rh^{106} , dabei werden keine Photonen ausgesendet. Die Halbwertszeit für diesen Zerfall beträgt 367 Tage [12]. Die maximale Energie des β^- ist 0.0394 MeV.

Rh^{106} zerfällt mit einer Halbwertszeit von 30 Sekunden in verschiedene Energieniveaus von Paladium Pd^{106} , welche unter Photonemission in den Grundzustand zerfallen. Ein zweiter metastabiler Zustand von Rh^{106} zerfällt ebenfalls in Pd^{106} mit einer Halbwertszeit von 130 Minuten. Dabei sind 9 verschiedene maximale Energien für die β^- und 36 Photonlinien bekannt.

Die für uns wichtigen β^- stammen vom Rh^{106} (30 s). Die grösste maximale Energie ist 3.55 MeV (67%); weitere Energien liegen bei 3.05 MeV (13%), 2.39 MeV (17%) und 2.0 MeV (2%).

Rh^{106} (130 m): 1.62 MeV (10%), 1.18 MeV (11%), 0.95 MeV (38%) und 0.79 MeV (40%).

Pd^{106} ist stabil.

Angaben aus:

Table of Isotops
sixth Edition
Lederer, Hollander, Perlman
John Wiley & Sons INC
New York - London - Sydney, 1967

CALIBRATION CERTIFICATE

Serial number : 893095 A

Date : 23-08-1989

Model number : F 201C-FA

We herewith certify that the above-mentioned instrument has been calibrated in accordance with the values and conditions stated below.

CUSTOMER CONDITIONS

Gas : Ar
 Density : 1.782 kg/m³
 Supply pressure : 1.5 bara
 Back pressure : 1 bara
 Temperature : 20 °C
 Max. flow required : 96 l/h

CALIBRATION CONDITIONS

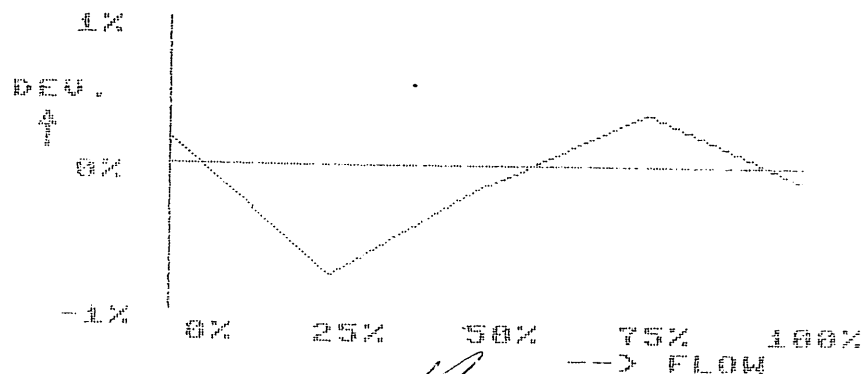
Gas : Ar
 Density : 1.782 kg/m³
 Supply pressure : 1.5 bara
 Pressure : 1023 mbara
 Temperature : 22 °C

DESIRED FLOW	DESIRED OUTPUT SIGNAL	CALIBRATED FLOW *	DEVIATION
100%	5.00 V	96.1 l/h	- .11 %
75%	3.75 V	71.64 l/h	.38 %
50%	2.50 V	48.15 l/h	- .16 %
25%	1.25 V	24.8 l/h	- .83 %
0%	10.0 mV	.00 l/h	.20 %

* Normal(n) conditions at 0°C and standard(s) at 20°C, both at 1 atm.

Calibrator : A.J.K.

Standard deviation : .48 %



SIGNED :

BRONKHORST HIGH-TECH B.V. RUURLO HOLLAND

CALIBRATION CERTIFICATE

Serial number : 893094 A

Date : 23-08-1989

Model number : F 2010-FA

We herewith certify that the above-mentioned instrument has been calibrated in accordance with the values and conditions stated below.

CUSTOMER CONDITIONS

CALIBRATION CONDITIONS

Gas : CH₄
 Density : .715 kg/m³
 Supply pressure : 1.5 bara
 Back pressure : 1 bara
 Temperature : 20 °C
 Max. flow required : 96 l/h

Gas : AIR
 Density : 1.293 kg/m³
 Supply pressure : 1.5 bara
 Pressure : 1026 mbara
 Temperature : 20.8 °C

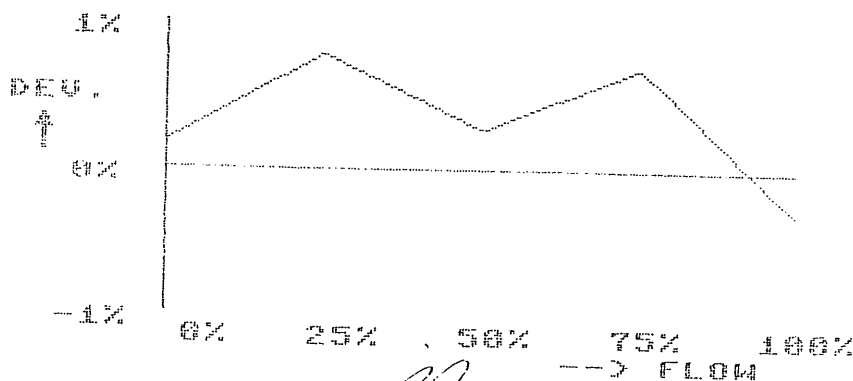
BRONKHORST HIGH-TECH B.V. RUURLO HOLLAND

DESIRED FLOW	DESIRED OUTPUT SIGNAL	CALIBRATED FLOW *	DEVIATION
100%	5.00 V	96.32 l/h	-.33 %
75%	3.75 V	71.27 l/h	.76 %
50%	2.50 V	47.72 l/h	.29 %
25%	1.25 V	23.18 l/h	.85 %
0%	10.0 mV	.00 l/h	.20 %

* Normal(n) conditions at 0°C and standard(s) at 20°C, both at 1 atm.

Calibrator : A.J.K.

Standard deviation : .62 %



SIGNED : 

CALIBRATION CERTIFICATE

Serial number : 893095 B

Date : 23-08-1989

Model number : F 201C-FA

We herewith certify that the above-mentioned instrument has been calibrated in accordance with the values and conditions stated below.

CUSTOMER CONDITIONS

CALIBRATION CONDITIONS

Gas : CO₂
 Density : 1.964 kg/m³
 Supply pressure : 1.5 bara
 Back pressure : 1 bara
 Temperature : 20 °C
 Max. flow required : 96 l/h

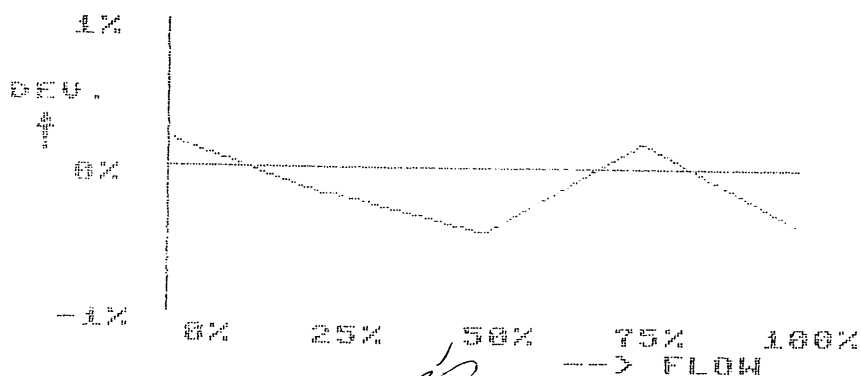
Gas : CO₂
 Density : 1.964 kg/m³
 Supply pressure : 1.5 bara
 Pressure : 1023 mbara
 Temperature : 22 °C

DESIRED FLOW	DESIRED OUTPUT SIGNAL	CALIBRATED FLOW *	DEVIATION
100%	5.00 V	96.41 l/h	-.43 %
75%	3.75 V	71.83 l/h	.18 %
50%	2.50 V	48.46 l/h	-.48 %
25%	1.25 V	24.21 l/h	-.21 %
0%	10.0 mV	.00 l/h	.20 %

* Normal (n) conditions at 0°C and standard (s) at 20°C, both at 1 atm.

Calibrator : A.J.K.

Standard deviation : .37 %



SIGNED :

BRONKHORST HIGH-TECH B.V. RUURLO HOLLAND

CALIBRATION CERTIFICATE

Serial number : 893095 D

Date : 28-08-1989

Model number : F 201D-FA

We herewith certify that the above-mentioned instrument has been calibrated in accordance with the values and conditions stated below.

CUSTOMER CONDITIONS

Gas : C₄H₁₀
 Density : 3.593 kg/m³
 Supply pressure : 1.5 bara
 Back pressure : 1 bara
 Temperature : 20 °C
 Max. flow required : 96 l/h

CALIBRATION CONDITIONS

Gas : AIR
 Density : 1.293 kg/m³
 Supply pressure : 3 bara
 Pressure : 1018.5 mbara
 Temperature : 21.6 °C

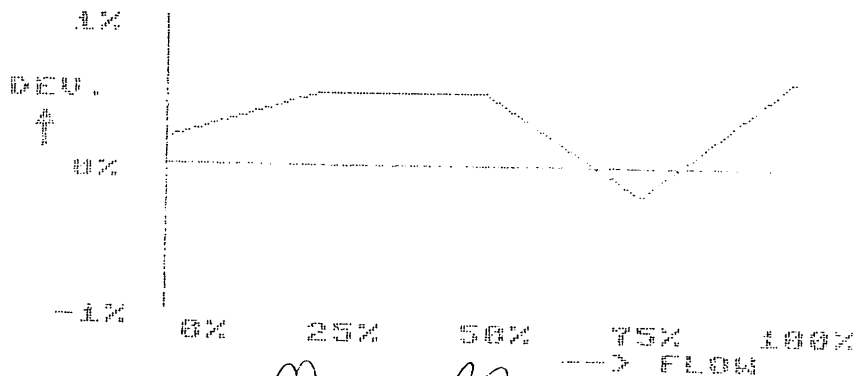
BRONKHORST HIGH-TECH B.V. RUURLO HOLLAND

DESIRED FLOW	DESIRED OUTPUT SIGNAL	CALIBRATED FLOW *	DEVIATION
100%	5.00 V	95.38 l/h	.64 %
75%	3.75 V	72.21 l/h	-.27 %
50%	2.50 V	47.48 l/h	.54 %
25%	1.25 V	23.48 l/h	.54 %
0%	10.0 mV	.00 l/h	.20 %

* Normal(n) conditions at 0°C and standard(s) at 20°C, both at 1 atm.

Calibrator : H.H.H.

Standard deviation : .52 %



SIGNED :

Literaturverzeichnis

- [1] HI-TEC
Benutzer-Handbuch
für Modellreihe F-100/200
- [2] Shuzo Ohe
Computer aided data book of vapor pressure
Databook Publishing Company, 1976
- [3] RTI-820
User's Manual
Analog Devices, Inc. 1987
- [4] STB-HL02 High-Level Voltage Panel
User's Guide
Analog Devices, Inc. 1988
- [5] RTI-800, 802, 815, 817, 820
Software manual
Analog Devices, Inc. 1988
- [6] Turbo-Pascal
Owner's Handbook
Borland International
- [7] Wissenschaftlicher Jahresbericht 1887/1988 p 36 ff
Physik-Institut der Universität Zürich
Schönberggasse 9, 8001 Zürich
- [8] Wissenschaftlicher Jahresbericht 1988/1989 p 31 ff
Physik-Institut der Universität Zürich
Schönberggasse 9, 8001 Zürich
- [9] Wissenschaftlicher Jahresbericht 1989/1990 p 31 ff
Physik-Institut der Universität Zürich
Schönberggasse 9, 8001 Zürich
- [10] F.Sauli
Principles of Operation of Multiwire, Proprtional and Drift Chambers
CERN Report 77-09 (1977)
- [11] K.Kleinknecht
Detektoren für Teilchenstrahlung
B.G. Teubner Stuttgart, 1987
- [12] Table of Isotops
sixth Edition
Lederer, Hollander, Perlman
John Wiley & Sons, Inc.
New York - London - Sydney, 1967

Verdankung

Da bei einem grösseren Projekt immer mehr als nur gerade einer daran beteiligt sind, möchte ich an dieser Stelle all diejenigen aufführen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben:

- P. Truöl als Diplomvater, er hat immer wieder Zeit gefunden, mir bei meinen Problemen, seinen Rat zu geben.
- U. Straumann es war aufschlussreich, mit ihm zu diskutieren.
- S. Eichenberger bei allen Computerproblemen.
- Käthi Müller bei allen Kammer- und Gasproblemen.
- O. Knecht er hatte bei allen mechanischen Problemen seine Hände im Spiel.
- H. Isliker er hat den Bubbler zusammengeschweisst.
- W. Fässler er kennt alle Firmen, bei denen irgendwelche nützlichen Dinge zu bestellen sind.