Fakultät für Physik und Astronomie
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Aufbau und Inbetriebnahme eines automatisierten Gasversorgungssystems für das innere Spurkammersystem des Hera-B Experimentes

Diplomarbeit
im Studiengang Physik

vorgelegt von
Carsten Michael Heiß
aus Emmerich

Januar 1999

Fakultät für Physik und Astronomie
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Diplomarbeit
im Studiengang Physik

vorgelegt von
Carsten Michael Heiß
aus Emmerich

Januar 1999

Aufbau und Inbetriebnahme eines automatisierten Gasversorgungssystems für das innere Spurkammersystem des Hera-B Experimentes

Die Diplomarbeit wurde von Carsten Michael Heiß ausgeführt am
Physikalischen Institut
unter der Betreuung von
Herrn Prof. Franz Eisele

Das Physikalische Institut der Universität Heidelberg arbeitet seit 1994 an der Entwicklung und dem Bau des inneren Spurkammersystems des Hera-B Experimentes am Deutschen Elektronensynchrotron (DESY) in Hamburg. Ziel des Experimentes ist es, die $\mathcal{CP}$-Verletzung im B-System nachzuweisen. Die Teilchennachweiskammern des inneren Spurkammersystems sind Gas-Mikrostreifen-Kammern (GEM-MSGC), in denen die nachzuweisenden Teilchen durch ihre Ionisationswirkung im Gas detektiert werden.
Ein automatisiertes Gasversorgungssystem für diese Kammern aufzubauen und in Betrieb zu nehmen, ist der Inhalt dieser Arbeit.
Das System gliedert sich in eine Gasregelung, deren Ziel es ist, den Druck in den Kammern zu regulieren. Bauartbedingt ist es hierbei notwendig, den Kammerdruck möglichst nahe am Atmosphärendruck mit geringen Schwankungen im Bereich einiger μbar zu halten und dabei gleichzeitig einen Gasfluß durch jede Kammer von bis zu 20 ml/min sicherzustellen. Die Schwierigkeiten dabei sind die insgesamt 110 Meter langen Gasleitungen, die Höhenunterschiede von 3,5 Metern und das relativ kleine Regelvolumen, das etwa 300 Milliliter pro Kammer beträgt.
Weiterhin besteht das System aus einer ebenfalls automatisierten Gasmischanlage, die die für den Betrieb der Kammern notwendige Mischung aus Argon und Dimethylether erzeugt. Die Arbeit dokumentiert die Auswahl und die Tests der notwendigen Hardware, den Aufbau eines Prototypsystems in Hamburg und die Programmierung der benötigten Steuerungstechnik. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse wird ein endgültiges System für das Jahr 1999 konzipiert.

The Automated Gassystem of the Hera-B Inner Tracker

In 1994 the Physikalische Institut of the University of Heidelberg started with the development of the inner tracking system for the HERA-B experiment at DESY in Hamburg. The goal of this experiment is the measurement of $\mathcal{CP}$ violation in the B system.
The inner tracking system detects tracks of charged particles in microstrip gas chambers (GEM- MSGC).
The task of this work was the construction of a fully automated gas supply system for these chambers as well as its integration in the experiment with first performance tests.
The gas system is separated into a mixing system (Argon and Dimethylether) and a regulating system. The latter regulates the pressure in the chambers close to atmospheric pressure and ensures a gas flow of up to 20 ml/min. The construction of the chambers doesn't allow for pressure variations larger than a few μbars.
The main difficulties with it lie in the length of the gaspipes (110 m), the height difference between the gas system and the chambers (3.5 m) and the small gas volume of the chambers (300 ml/chamber).
This work describes the selection and test of the hardware components, the construction of a prototype system and the programming of the steering electronics. The succesfull installation of the prototype system allowed the design of a final system for the regulation of 184 chambers which will be installed in 1999.

Fortschritt ist das Werk der Unzufriedenen.

Jean-Paul Sartre

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

1.1 $\mathcal{CP}$-Verletzung

Das Auftreten von Symmetrien ist in der Physik ein elementares Prinzip.
Bei der gravitativen, der elekromagnetischen und der starken Wechselwirkung bleiben die Naturgesetze bei Anwendung einer der folgenden Symmetrieoperationen erhalten:

C: Ladungskonjugation	(Vertauschung von Teilchen und Antiteilchen)
P: Paritätsoperation	(räumliche Spiegelung am Ursprung des Raumes)
T: Zeitumkehroperation	(Umkehr der Zeitrichtung)

Die schwache Wechselwirkung jedoch verletzt die Parität maximal [WU]. Die Annahme, wenigstens die Hintereinanderausführung der Ladungskonjugation und der Paritätsoperation ($\mathcal{CP}$-Operation) würde auch in der schwachen Wechselwirkung eine elementare Symmetrie darstellen, d.h. keinerlei Veränderung der physikalischen Prozesse bringen, erwies sich mit der Entdeckung der $\mathcal{CP}$-Verletzung im Kaon-System 1964 [CHRISTENSON] als falsch.
Die $\mathcal{CP}$-Verletzung ist über das $\mathcal{CPT}$-Theorem[1] eng mit einer Verletzung der Zeitumkehrinvarianz physikalischer Prozesse verknüpft.
Ein von Kobayashi und Maskawa vorgeschlagener Mechanismus (1973) [KOBAYASHI] macht es möglich, die $\mathcal{CP}$-Verletzung im Standardmodell zu erklären (CKM-Matrix), es ist jedoch nicht klar, ob sich die $\mathcal{CP}$-Verletzung tatsächlich auf diese Weise erklären läßt, oder nicht vielleicht ihre Ursache außerhalb des Standardmodells zu finden ist. Es gibt Theorien, die die $\mathcal{CP}$-Verletzung durch eine weitere, nicht im Standardmodell enthaltene, fünfte Wechselwirkung (superschwach) erklären. Weiterhin existieren theoretische Arbeiten, die die für die bestehende Baryonenasymmetrie notwendige $\mathcal{CP}$-Verletzung nicht mit dem Standardmodell vereinbar sehen. Präzisionsmessungen der $\mathcal{CP}$-Verletzung sind deshalb ein guter Test des Standardmodells und könnten den Weg weisen zu "neuer Physik".
Eine bessere Möglichkeit zur Messung der $\mathcal{CP}$-Verletzung - als im K-System (hier ist der Effekt sehr klein [Größenordnung 10^{-3}]) - sollte das System der neutralen B-Mesonen bieten, da hier die vom Standardmodell zugelassene $\mathcal{CP}$-Verletzung sehr groß ist. Durch die redundante Messung mehrerer Parameter kann in diesem System das Standardmodell auf seine Richtigkeit hin überprüft werden, d.h. es kann getestet werden, ob eine mögliche $\mathcal{CP}$-Verletzung im B-System mit der vom Standardmodell zugelassenen $\mathcal{CP}$-Verletzung verträglich ist.

Die Messung der $\mathcal{CP}$-Verletzung im B-System ist das Ziel des HERA-B Experimentes.

[1] Das $\mathcal{CPT}$-Theorem besagt, daß es nicht möglich ist, eine kausale, lorentzinvariante, lokale Quantenfeldtheorie zu konstruieren, die $\mathcal{CPT}$ verletzt [SCHUBERT] [CASELLA].

1.2 Hera-B Experiment

Hera-B [HERA B 1] [HERA B 2] ist ein Experiment am Deutschen Elektronensynchrotron (DESY) in Hamburg, das im Rahmen einer internationalen Kollaboration von 33 Instituten in 13 Ländern mit etwa 250 Physikern durchgeführt wird.
Die Abbildung 1.1 zeigt den Hera-Ring (Umfang 6336 m) mit seinen Wechselwirkungszonen. Das Hera-B Experiment befindet sich in der Halle West.

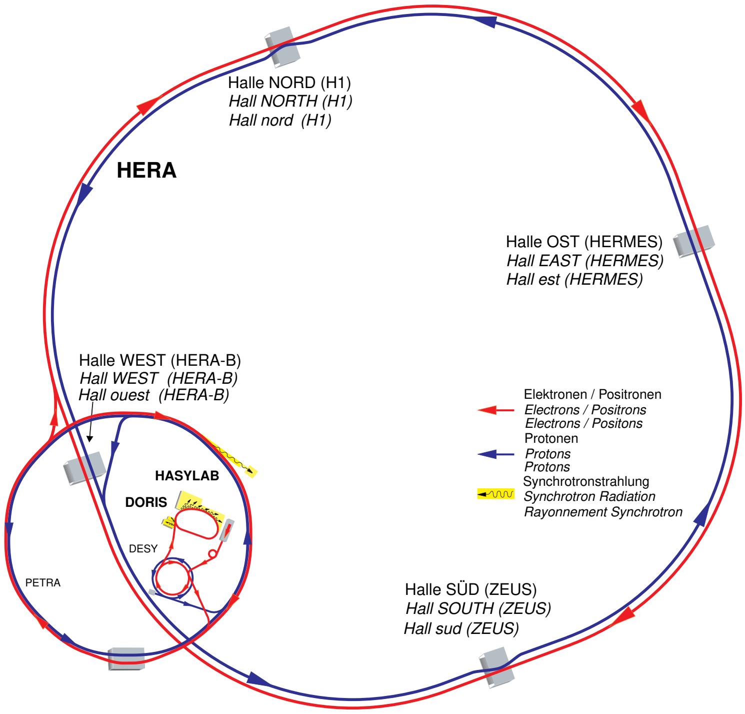

Abb. 1.1: Der Hera Ring

1.2.1 Prinzip der Messung

Das Experiment Hera-B nutzt ausschließlich die in HERA gespeicherten Protonen aus. Protonen aus dem Halo eines Bunches, d.h. aus dessen Randbereich, prallen mit 920 GeV auf ein Draht-Target (Aluminium oder Carbon). Es entstehen neue Teilchen, darunter in seltenen Fällen auch B-Mesonen-Paare. Diese zerfallen wieder. Für die Messung einer möglichen $\mathcal{CP}$-Verletzung im B-System besonders relevant sind die B^0-Mesonen, bei denen dies in einem sogenannten "goldenen Zerfall" geschieht ($B^0 \rightarrow J/\Psi K_s^0$ bzw. $\bar{B}^0 \rightarrow J/\Psi K_s^0$). Dieser besondere Zerfall wird so benannt, da er für die Messung der $\mathcal{CP}$-Verletzung eine sehr gute Signatur und eindeutige theoretische Vorhersagen besitzt. Die $\mathcal{CP}$-Verletzung wird nachgewiesen durch die unterschiedliche Häufigkeit N eines solchen speziellen Zerfalls der B^0-Mesonen ($N(B^0 \rightarrow f)$), verglichen mit der der Antiteilchen dieser Mesonen ($N(\bar{B}^0 \rightarrow f)$).

Das Ziel von Hera-B ist somit die Messung der folgenden Asymmetrie:

$$\frac{N(\bar{B}^0 \rightarrow f) - N(B^0 \rightarrow f)}{N(\bar{B}^0 \rightarrow f) + N(B^0 \rightarrow f)} = A$$

Hierbei ist f ein $\mathcal{CP}$-Eigenzustand.

Der **goldene Zerfall** eines B^0-Mesons ist in Abbildung 1.2 dargestellt:

Ein hochenergetisches Proton erzeugt durch das Auftreffen auf das Target ein B-Mesonen-Paar, in dem dargestellten Fall ein B^0 und ein B^-. Das B^0 zerfällt, im Gegensatz zu anderen möglichen Teilchen, erst nach einer mittleren freien Wegstrecke von 1 cm in ein J/Ψ und ein K_s^0. Das J/Ψ wiederum zerfällt sofort in ein Leptonpaar, hier in ein μ^+ und ein μ^-. Nach einer mittleren freien Weglänge von 1,1 m zerfällt auch das K_s^0 in π^+ und π^-.
Das Tagging ist wichtig, um herauszufinden, ob es sich um den Zerfall eines B^0 ($\bar{b}d$) oder eines $\bar{B}^0$ ($b\bar{d}$) handelt. Eine gute Möglichkeit hierzu bietet der semileptonische Zerfallskanal, bei dem die Lepton-Ladung das B-Meson identifiziert. Zerfällt im Tagging-Kanal ein b-Quark ($b \rightarrow c + e^- + \bar{\nu_e}$), handelt es sich im oberen Zweig um ein B_0, zerfällt dagegen ein $\bar{b}$ ($\bar{b} \rightarrow c + e^+ + \nu_e$), hat man es im oberen Zweig mit einem $\bar{B_0}$ zu tun. Diese Schlußfolgerung ergibt sich aus der Tatsache, daß auf jeden Fall bei der Proton-Wechselwirkung ein $b\bar{b}$-Quarkpaar erzeugt werden muß.

Die Schwierigkeit der Messung unter den Bedingungen von Hera-B liegt in der Tatsache, daß der $b\bar{b}$-Wirkungsquerschnitt sehr gering ist (14 - 40 nb) und die geeigneten Zerfallskanäle nur mit sehr kleinen Verzweigungsverhältnissen vorkommen. Aus einer Million Wechselwirkungen erzeugt bei Hera-B nur eine einzige ein B-Mesonenpaar, und das Verzweigungsverhältnis $B^0 \rightarrow J/\Psi K_s^0$ liegt bei nur 10^{-4}. Es müssen also pro Jahr etwa 10^{15} Wechselwirkungen stattfinden, damit ungefähr 10^9 B-Mesonen entstehen, bei denen dann wiederum nur etwa 3000 goldenen Zerfälle der B^0-Mesonen nachgewiesen[2] werden.

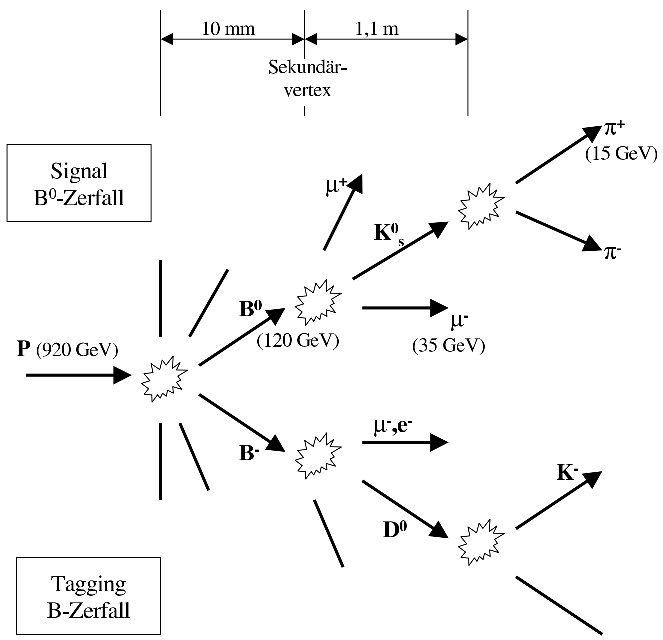

Abb. 1.2: Der "goldene" B-Zerfall

[2]Die Wahrscheinlichkeit des Nachweises $B^0 \rightarrow J/\Psi K_s^0$ ergibt einen weiteren Faktor von $\approx 10^{-2}$.

1.2.2 Detektor

Die sehr große Zahl von Wechselwirkungen, die im Detektor gesehen werden müssen, um die erwartete Asymmetrie A zu messen, führt zu folgenden Anforderungen an den Detektor:

- Er muß in der Lage sein, aus der immensen Anzahl von Wechselwirkungen die wenigen interessanten auszuwählen.
- Eine Ereignisrate von etwa 40 MHz muß verkraftet werden.
- Strahlenbelastungen bis zu mehreren Mrad pro Jahr dürfen die Funktionsweise nicht einschränken.

Der Detektor ist ein etwa 20 m langes magnetisches Spektrometer. Die folgende Aufstellung beschreibt die wesentlichen Komponenten des Detektors (in Protonstrahlrichtung gesehen):

- **Target:** Das Target besteht aus acht in Quadraten aufgespannten, 50 μm dicken und einen Millimeter breiten Aluminiumdrähten.
- **Vertex-Detektor:** Dieser besteht aus Silizium-Streifenzählern, die den Wechselwirkungspunkt und den sekundären Zerfallsvertex des B-Mesons messen.
- **Magnet:** Er wird eingesetzt zur Impulsbestimmung der geladenen Teilchen.
- **Spurkammersystem:** Das Spurkammersystem besteht aus dem inneren (ITR)[3] und äußeren (OTR) System. Es hat die Messung der Teilchenspuren zur Aufgabe.
- **RICH:** (Ring Imaging Čherenkov Detector) Dieser separiert π und K-Mesonen.
- **elektromagnetisches Kalorimeter:** Hier findet die Identifizierung der Elektronen statt.
- **Myondetektor:** Dieser identifiziert die Myonen.

Der schematische Aufbau des Hera-B Detektors ist in der Abbildung 1.3 in einer Seitenansicht und einer Aufsicht dargestellt.

1.2.3 Inneres Spurkammersystem

Aufbau

Das Physikalische Institut der Universität Heidelberg arbeitet in einer Kollaboration mit den Universitäten aus Siegen und Zürich an der Erstellung des Inneren Spurkammersystems, das die Aufgabe hat, Teilchenspuren in der Nähe des Strahlrohres zu vermessen.
Die Spurkammern des ITR, die GEM-MSGCs[4], decken zwar nur einen relativ kleinen Bereich von (50 x 50) cm^2 um das Strahlrohr herum ab, dieser enthält aber rund 40 % aller Teilchenspuren. Der Inner-Tracker muß deshalb sehr große Teilchenflußdichten, von 10^5/r Teilchen pro mm^2 und Sekunde verarbeiten, wobei r der radiale Abstand vom Strahlrohr in cm ist. Das Foto in Abbildung 1.4 zeigt eine Kammer des Spurkammersystems, die ein Viertel des Bereiches um das Strahlrohr herum abdeckt.

10 Stationen werden entlang des Strahlrohres positioniert. Eine Station enthält dabei je

[3] Inneres Spurkammersystem, engl. Inner Tracker (ITR)

[4] Eine GEM-MSGC ist eine MSGC (micro-strip-gas-chamber) mit einer integrierten GEM-Folie (gas-electron-multiplier).

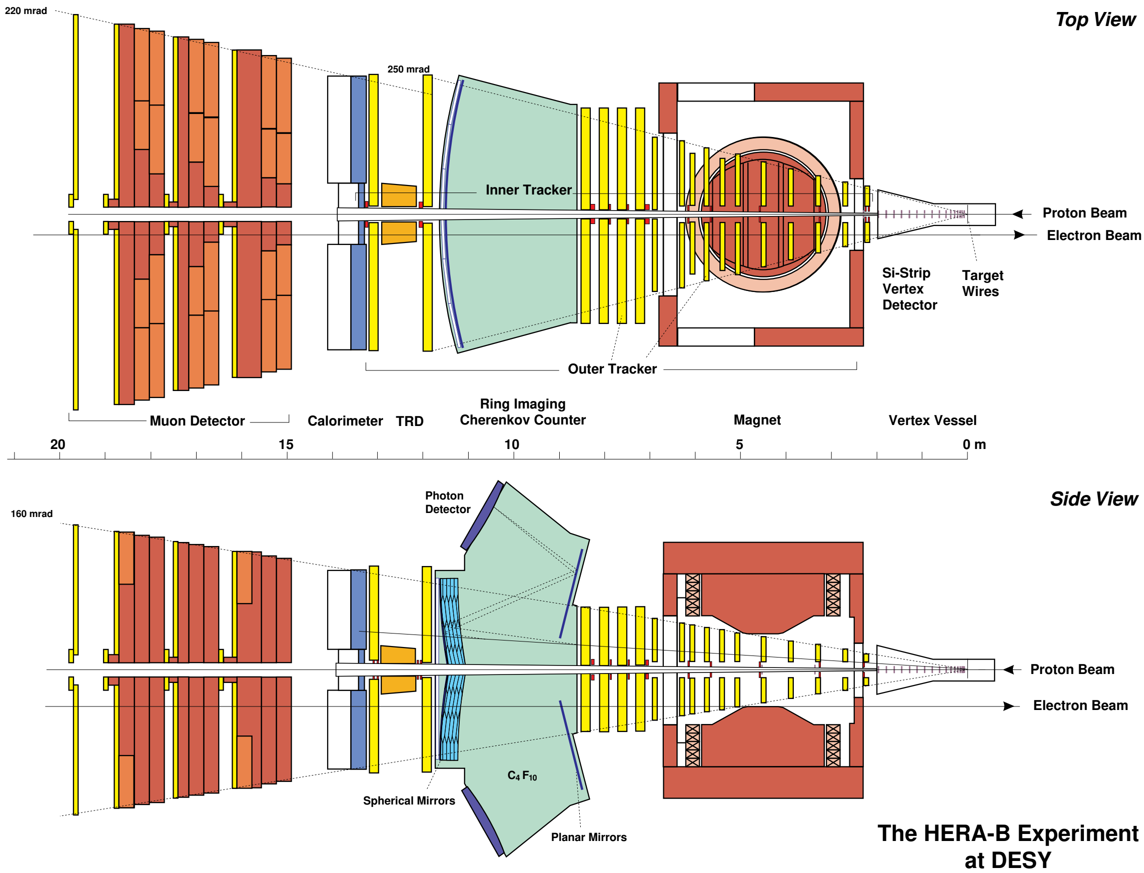

Abb. 1.3: Hera-B Detektor

nach Einsatzort 2 bis 8 Detektorebenen, die aus jeweils 4 Kammern bestehen. Insgesamt werden 184 Kammern eingesetzt. Um eine zweidimensionale Ortsauflösung zu erreichen, werden die Detektorebenen um einen Stereowinkel von ±5 Grad gegeneinander gedreht. So erzielt man neben der bestehenden Ortsauflösung der MSGS in der x-Richtung ($\Delta x = 80\mu m$) eine Auflösung in der y-Richtung von $\Delta y = 0,8mm$.

In Abbildung 1.5 ist der schematische Aufbau einer GEM-MSGC gezeigt:
Auf einem 0,4 mm dünnen Glassubstrat, dem sogenannten Wafer, befinden sich die Anoden und Kathodenstreifen. Auf den Wafer wird der Rahmen geklebt, durch den die Gasversorgung der Kammern sichergestellt wird. Der Rahmen trägt die Driftelektrode, die gleichzeitig der Deckel der Kammer ist. Zwischen dem Wafer und dem Deckel ist - jeweils im gleichen Abstand von 3mm - die GEM-Folie gespannt. Dabei handelt es sich um eine 50 μm dicke, mit Kupfer beschichtete Kaptonfolie, in die in regelmäßigen Abständen Löcher[5] geätzt sind. Der Abstand zwischen dem Wafer und dem Deckel beträgt etwa 6 mm. Damit ergibt sich eine Gesamtbauhöhe der Kammern von rund 7 mm. Die angelegten Spannungen und das entstehende Feld können der Abbildung entnommen werden.

[5]Die Löcher sind hexagonal angeordnet. Der Durchmesser eines Lochs im Kupfer beträgt $90\mu m$; im Kapton entstehen durch die Ätzung Löcher mit einem Durchmesser von $50\mu m$. Der Abstand zweier Löcher (pitch) beträgt $140\mu m$.

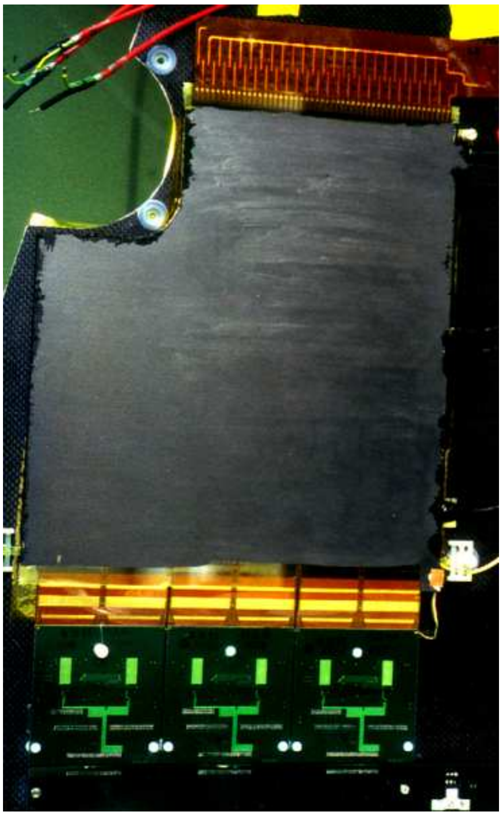

Abb. 1.4: Eine GEM-MSGC mit Auslese-Elektronik

Prinzip des Teilchennachweises

Beim Durchgang durch die GEM-MSGC ionisiert das nachzuweisende Teilchen Atome des Gases (Abbildung 1.5). Die im Bereich zwischen dem Driftdeckel und der GEM-Folie durch diese Primärionisation erzeugten Elektronen sind die für den Prozeß der Gasverstärkung[6] relevanten. Die freigesetzten Elektronen (im Mittel 30 Elektronen) driften durch das angelegte Driftfeld (4,3 kV/cm) bis in die Löcher des GEMs (GEM-Spannung[7] typ.: 410 Volt / mittleres GEM-Potential = 1600 V). Dort erzeugen sie aufgrund der erhöhten Feldstärke durch Stoßionisation weitere Elektronen (Sekundärionisation). Der Multiplikationsfaktor liegt bei den typischen Spannungen (Abbildung 1.5) bei Werten von $A_{GEM} = 20-30$. Die Elektronen driften dann durch das sogenannte Transferfeld (4,1 kV/cm) zur Anode und werden dort erneut gasverstärkt. Hier liegt der Verstärkungsfaktor dann bei etwa $A_{Wafer} = 200$. Insgesamt ergibt sich eine Gasverstärkung von rund

$$A_{gesamt} = A_{GEM} * A_{Wafer} = 4000.$$

Die Ladung der auf die Anode treffenden Elektronen ist das Signal, das gemessen wird.

[6]Die Gasverstärkung A (engl. gain) ist das Verhältnis von Sekundär- zur Primärionisation.

[7]Die GEM-Spannung ist die Spannungdifferenz, die zwischen der Ober- und der Unterseite der Folie herrscht. Direkt am GEM werden 2 Spannungen (GEM-oben und GEM-unten) separat angelegt.

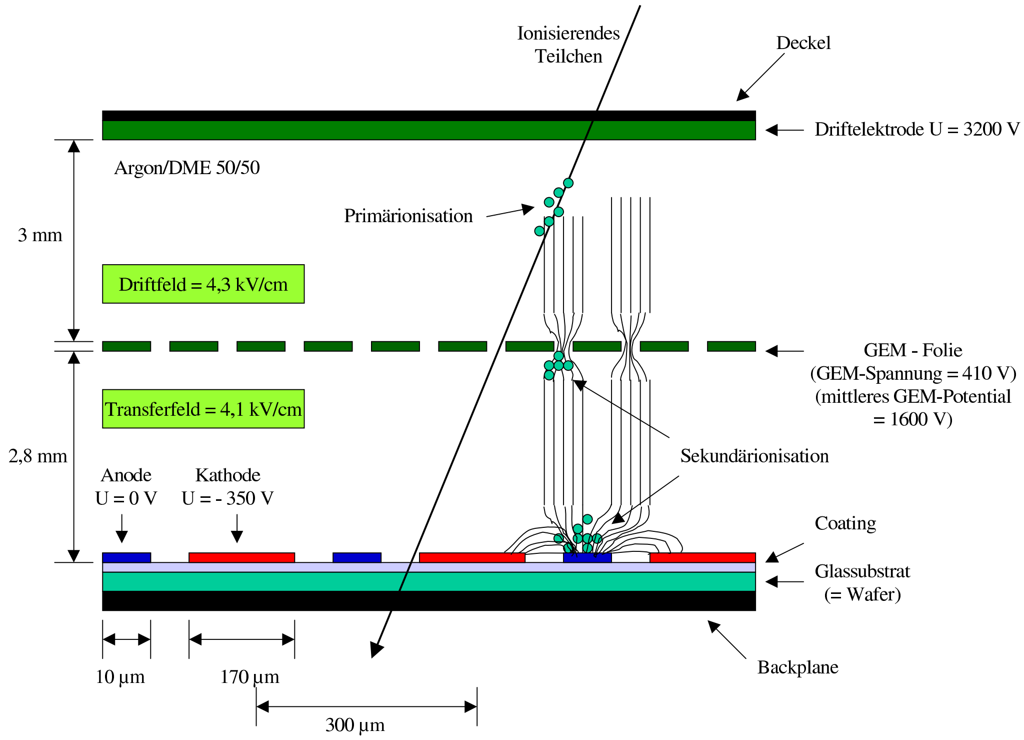

Abb. 1.5: Schematische Darstellung des Teilchennachweises in einer GEM-MSGC (nicht maßstäblich)

Gassystem

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau und der Inbetriebnahme eines automatisierten Gasversorgungssystems für die Teilchennachweiskammern des Inneren Spurkammersystems. Das Versorgungssystem gliedert sich dabei im wesentlichen in zwei Teile:

Ein automatisiertes **Regelsystem** hat die Aufgabe, den Druck in den Kammern auf den Atmosphärendruck zu regulieren, wobei nur geringe Schwankungen im Bereich einiger μbar zulässig sind. Diese Forderung resultiert aus der Bauart der Kammern. Erstens könnten die Kammern bei zu hohem Über- oder Unterdruck zerstört werden (kritische Grenze etwa ± 5 mbar gegen Atmosphärendruck), und zweitens könnte die Betriebsfähigkeit durch Verformungen der Kammern gestört werden (kritische Grenze etwa ± 300 μbar).
Gleichzeitig muß die Bedingung nach einem hohen Fluß durch jede Kammer (bis zu 20 ml/min) jederzeit erfüllt werden, um die Möglichkeit des Teilchennachweises sicherzustellen und eine Alterung[8] der Kammern zu verhindern (siehe Kapitel 2).

Eine ebenfalls automatisierte **Mischanlage** stellt die Versorgung des Regelsystems mit der

[8]Sehr geringe Flüsse würden bei den hohen Strahlungraten im Hera-B Detektor in den Kammern mit großer Wahrscheinlichkeit zu einem Alterungseffekt (Ageing) führen, der durch das Zählgas selbst hervorgerufen würde. Dabei kommt es zu isolierenden Ablagerungen auf den Anoden. Die Funktion der Kammer ist dann aufgrund der Änderung der Gasverstärkung nicht mehr gewährleistet.

erforderlichen Mischung aus Argon und Dimethylether[9] sicher.

Die Gasversorgung der Kammern geschieht, wie in Abbildung 1.6 gezeigt, durch zwei Gaskapillare und den Kammerhohlrahmen. Dabei strömt das Gas immer vom Kammerbogen her in die Kammer, damit dort, wo die Rate am größten ist, immer das frischeste Gas vorhanden ist.
Die prinzipielle Funktionsweise einer Regelung wird in Kapitel 2 beschrieben.

Die Zusammenfassung der 184 Kammern zu Kammer- bzw. Gasstationen macht die Abbildung 1.7 deutlich.

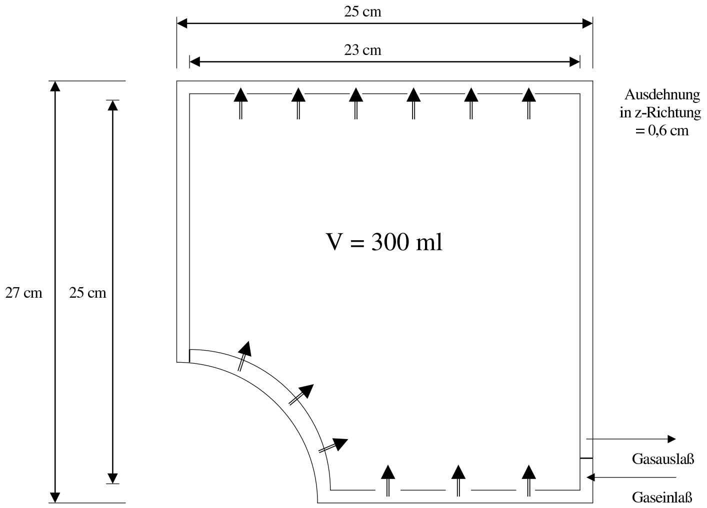

Abb. 1.6: Schemazeichnung der Gasversorgung einer Kammer

Prototyptest des Jahres 1998

Im Jahr 1998 wurde eine Hälfte einer Halbstation in den Hera-B Detektor eingebaut (MS012+) (Kapitel 4). Mit diesen zunächst 8 Kammern wurden die Auslese und das Gasregelsystem getestet. Im weiteren Verlauf des Jahres wurde eine Kammer dieses Paketes aufgrund von Kurzschlüssen entfernt, so daß sich alle Daten der Prototyptests des Gassystems auf die Regelung von 7 Kammern beziehen.

Das **Gasregelsystem** dieses Jahres war ein Prototypsystem für die Regelung einer Gasstation. Später soll es 16 Systeme geben (siehe Kapitel 7), die aber alle bis auf die Anzahl der zu regelnden Kammern gleich aufgebaut sein werden. Die aus den Tests des Prototypen (Kapitel 6) gewonnenen Erkenntnisse werden dabei genutzt, um die endgültigen Systeme zu konzipieren. Es zeigt sich, daß im Vergleich zum Prototypen fast keine Änderungen nötig sind. Die Regelung eines größeren Volumens, d.h. von mehr als 7 Kammern in einer Station,

[9]Dimethylether = DME (C_2H_6O).
Das DME-Molekül besteht aus einem zentral angeordneten Sauerstoffatom mit zwei angelagerten Metyl(CH_3)-Gruppen.

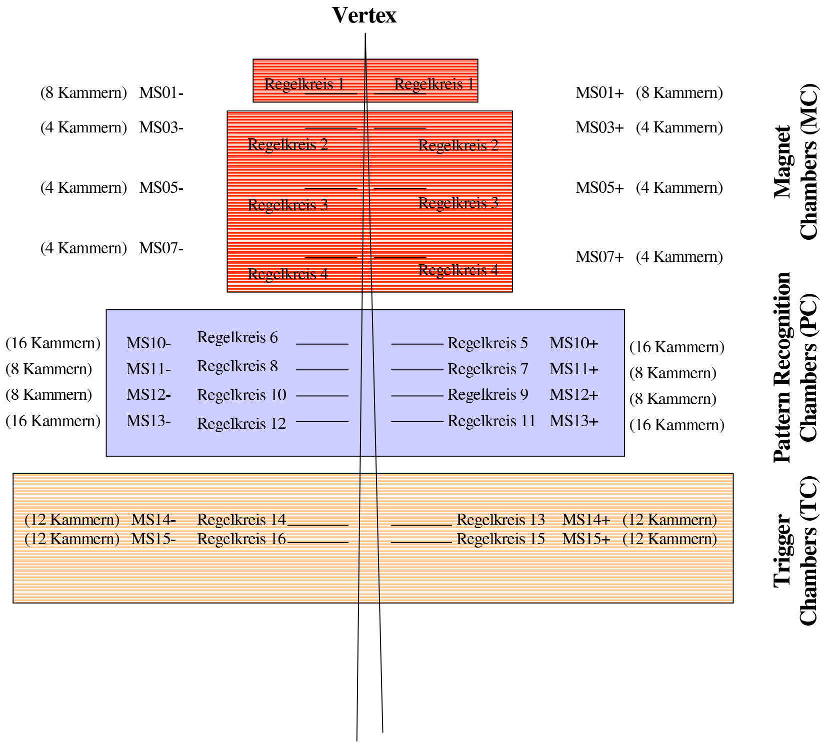

Abb. 1.7: Zusammenfassung der Kammern zu Stationen

ist sogar einfacher als die Regelung des Prototypen.

Eine **Gasmischanlage** wurde im Jahr 1998 nicht eingesetzt. Die Gasversorgung wurde durch vorgemischte Flaschen gewährleistet. Die zeitlich parallel in Heidelberg aufgebaute Gasmischanlage (siehe Kapitel 8) stellt im Gegensatz zur Gasregelung keinen Prototypen dar. Sie ist das endgültige Mischsystem für die Gasversorgung des Inner Trackers.

Kapitel 2

Anforderungen an das Gassystem

Dieses Kapitel stellt zunächst den prinzipiellen Aufbau einer Regelstrecke dar. Ferner wird die Wahl des Regelverfahrens behandelt. Ausgehend von dieser Einführung werden die Anforderungen an das Gassystem des ITR und die gewählten Wege, diesen Forderungen zu genügen, vertieft.

2.1 Grundkomponenten eines ITR-Regelkreises

Die zur Realisierung einer Regelung mindestens benötigten Komponenten und ihr Zusammenspiel werden in Abbildung 2.1 dargestellt.
Eine Druckdose mißt in dem zu regelnden Volumen ständig den Druck relativ zum herrschenden Atmosphärendruck. Der Regler ermittelt nun mit Hilfe des Regelalgorithmus aus dem gemessenen Druckwert und dem Vergleich mit dem eingestellten Solldruck (direkte Eingabe am Display des Reglers) einen Sollwert für die Öffnung des Massenflußreglers.
Die Unterschiede, die im wirklichen Regelsystem im Vergleich zu der beschriebenen und dar-

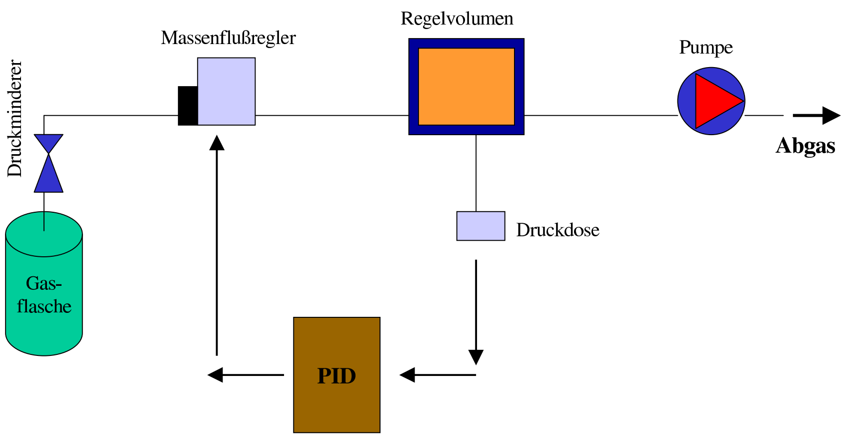

Abb. 2.1: Prinzipieller Aufbau einer Regelung

gestellten Regelstrecke auftreten, bestehen in den Höhenunterschieden zwischen den Standorten der einzelnen Komponenten und den Leitungslängen (Abbildung 2.2).
Die in der Abbildung genannten Komponenten werden, wenn nicht bereits geschehen, im

Kapitel 3 beschrieben.

Zwischen den Gasflaschen (Flaschenlager) und dem Massenflußregler (Elektroniktrailer) liegen beim Aufbau in Hamburg etwa 100 m Edelstahlleitungen. Die Verbindung zwischen Massenflußregler und Regelvolumen (Kammerstation) wird durch 55 m lange Wellschläuche hergestellt. Die Längenangaben gelten in gleicher Weise für die Rückleitung. Die Längen der Leitungen, die im Gassystem verlegt sind, sind nochmals im Abbildung 4.1 aufgeführt.

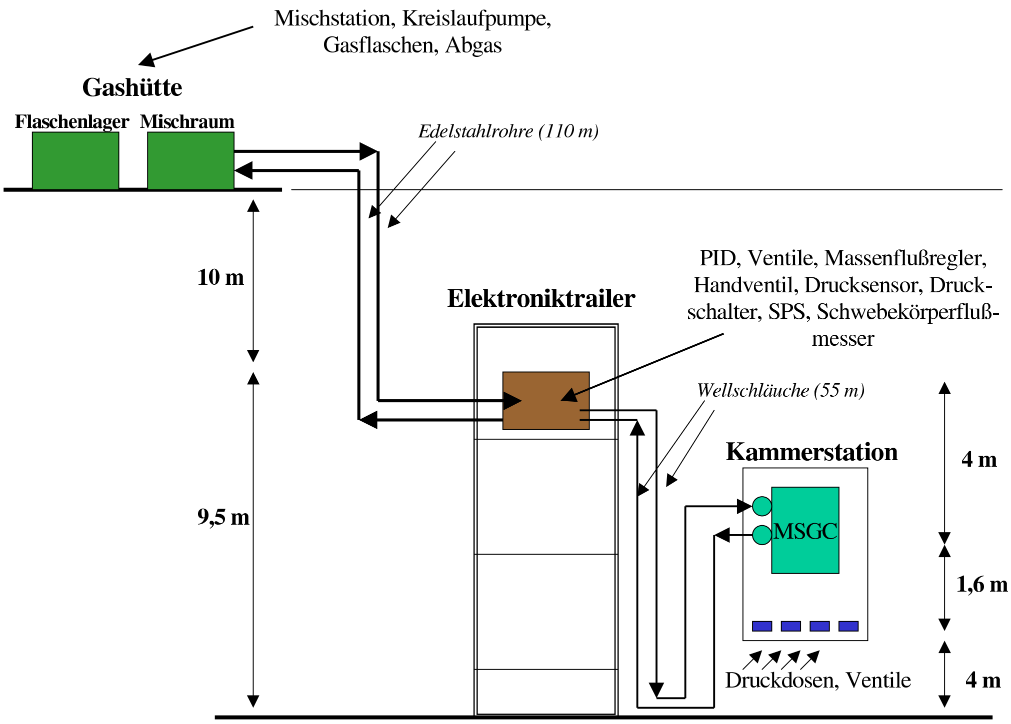

Abb. 2.2: Die Höhenunterschiede im Gassystem (nicht maßstäblich)

2.2 Wahl des Regelverfahrens

Im folgenden werden die Eigenschaften des PID-Regelalgorithmus und abgeleiteter Regler beschrieben [HUETTE].

2.2.1 Modell-Regelkreis

Die Abbildung 2.3 stellt die Grundbestandteile eines Regelkreises mit den jeweiligen Eingangs- und Ausgangsgrößen dar. Ebenfalls enthält die Abbildung eine Zuordnung der allgemeinen Bestandteile zu den Komponenten des Gassystems.
Aus der Differenz zwischen Sollwert [W(s)][1] und Istwert [Y(s)] der zu regelnden physikalischen Größe (hier: Druck in der Regelkammer) bildet der Regler ständig die Regelabweichung $E(s) = Y(s) - W(s)$ und verarbeitet sie zur Reglerausgangsgröße $u_R(t)$ (hier: Sollfluß). Die Ermittlung der Stellgröße $u(t)$ geschieht im Regelkreis des Gassystems durch einen zweiten

[1] "s" ist dabei die Laplacetransformierte der Zeit t.

Regelalgorithmus im Massenflußregler selbst.
Das Zusammenspiel zwischen dem Regler und dem Massenflußregler verdeutlicht die Abbildung 2.5. Die Regelung im Massenflußregler selbst führt zu einer gewissen Ansprechzeit, die allerdings nur beim Anfahren des Systems in Erscheinung tritt. Dieser zweite Regelmechanismus kann also im folgenden vernachlässigt werden. Vereinfachend kann man den Regler und das Stellglied zur Regeleinrichtung (Übertragungsfunktion $G_R(s)$[2]) zusammenfassen. Ebenfalls ist es möglich, das Meßglied (hier: Druckdose) zur Regelstrecke (Übertragungsfunktion $G_{SU}(s)$) zuzurechnen. Ein mögliches Störverhalten wird im weiteren vernachlässigt. Man gelangt so zu einer vereinfachten Darstellung des Regelkreises (Abbildung 2.4).

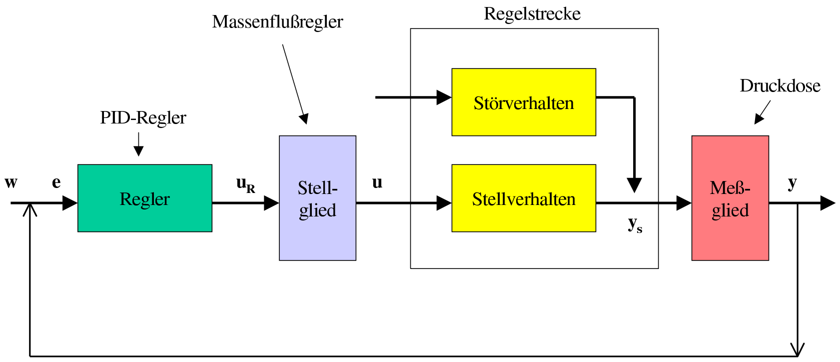

Abb. 2.3: Grundbestandteile eines Regelkreises

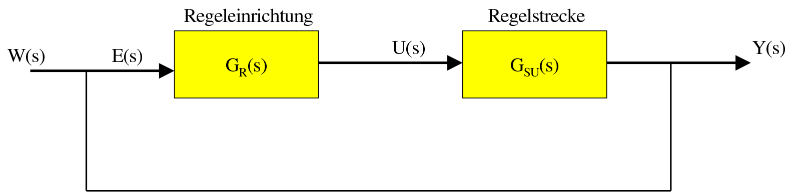

Abb. 2.4: Blockschaltbild des Regelkreises

2.2.2 Eigenschaften der Regler

Formal wird das Verhalten von Reglern durch Übertragungsfunktionen beschrieben. Aus diesen Funktionen läßt sich das zeitliche Verhalten der Reglerausgangsgröße $u_R(t)$ ermitteln.

Für den PID-Regler ergibt sich dabei folgende Funktion:

$$u_R(t) = K_R e(t) + \frac{K_R}{T_I}\int_0^t e(\tau)d\tau + K_R T_D \frac{de(t)}{dt}$$

Der obige Ausdruck setzt sich aus den drei idealisierten Grundformen eines P- (Proportional), I- (Integral) und D- (Differential) Gliedes[3] zusammen (siehe Abbildung 2.6). Im einzelnen bedeuten die enthaltenen Größen:

[2]Die Übertragungsfunktion ist die auf die Änderung der Eingangsgröße normierte Änderung der Ausgangsgröße.
[3]Dabei wird von der Vorstellung eines Reglers ausgegangen, dessen D-Verhalten nicht mit Verzögerungen behaftet ist.

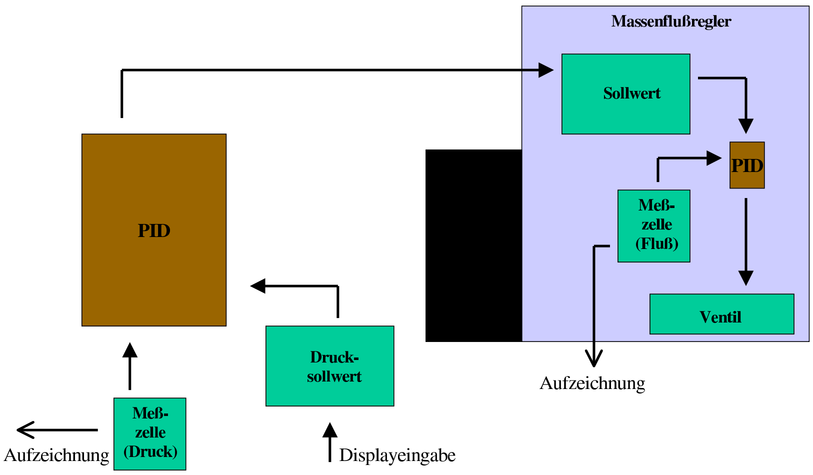

Abb. 2.5: Das Zusammenspiel der zwei Regelalgorithmen

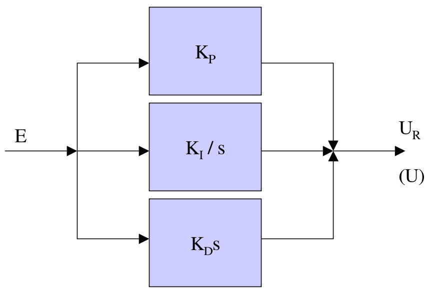

Abb. 2.6: Blockschaltbild des PID-Reglers

$K_R \;=\; K_P$ Verstärkungsfaktor
$T_I \;=\; \frac{K_P}{K_I}$ Integralzeit (Nachstellzeit)
$T_D \;=\; \frac{K_D}{K_P}$ Differentialzeit (Vorhaltezeit)

Welche oben genannten Anteile für eine Regelung notwendig sind, entscheidet sich durch die speziellen Anforderungen der Regelstrecke.

2.2.3 Qualitatives Verhalten des PID-Reglers und abgeleiteter Reglertypen

Alle anderen möglichen Regelalgorithmen lassen sich als Grenzfälle des PID-Reglers ableiten:

PI-Regler für $T_D = 0$
PD-Regler für $T_I \to \infty$
P-Regler für $T_D = 0$ und $T_I \to \infty$

Bezüglich des Regelverhaltens lassen sich dabei folgende qualitative Aussagen machen:

- **P-Regler:** Dieser weist ein relativ großes maximales Überschwingen der Regelgröße, eine große Ausregelungszeit[4] und eine bleibende Regelabweichung auf.
- **I-Regler:** Er besitzt ein noch größeres maximales Überschwingen als der P-Regler, da das I-Verhalten sehr langsam einsetzt. Allerdings gibt es keine bleibende Regelabweichung.
- **PI-Regler:** Die Kombination der Eigenschaften des P- und des I-Reglers ergibt ungefähr ein genauso großes maximales Überschwingen und eine Ausregelzeit wie beim P-Regler. Eine bleibende Regelabweichung tritt nicht auf.
- **PD-Regler:** Der schnelle D-Anteil führt zu einem geringeren maximalen Überschwingen als bei allen anderen bisher besprochenen Reglern. Die Ausregelzeit ist deutlich reduziert. Allerdings tritt eine bleibende Regelabweichung auf, die aber kleiner ist, als beim P-Regler.
- **PID-Regler:** Der PID-Regler vereinigt die Eigenschaften des PD- und des PI-Reglers. Neben einem noch geringen maximalen Überschwingen gibt es aufgrund des I-Anteils keine bleibende Regelabweichung. Die Ausregelzeit ist allerdings größer als beim PD-Regler.

Im Regelfall des Gassystems des ITR kommt es vor allem auf ein minimales Überschwingen an. Außerdem darf es keine bleibende Regelabweichung geben. Der PID-Regler ist somit für den ITR die optimale Wahl.

Die drei Größen K_R, T_I und T_D sind direkt am PID-Regler einstellbar. Der im Gassystem zum Einsatz kommende PID-Regler [ABB] verfügt über einen Selbsteinstellungsmechanismus, der es ihm ermöglicht, die drei angesprochenen Werte optimal auf die Regelstrecke anzupassen. Dadurch wurden im Prototypsystem (7 Kammern) folgende Einstellungen gefunden:

K_R = 402,3%
T_I = 3 sec
T_D = 0,8 sec

2.3 Charakteristika des Gassystems

2.3.1 Eigenschaften des verwendeten Gases

Zur Gasversorgung des ITR wird eine Mischung aus Argon (50%) und Dimethylether (50%) (siehe Kapitel 3.1.2) verwendet.

Dichte

Für die Dichte des Gasgemisches 20^0C gilt:

$$\rho_{Ar} = 1,784 \frac{kg}{m^3}$$
$$\rho_{DME} = 2,113 \frac{kg}{m^3}$$

$$\Rightarrow \rho_{Ar/DME(50/50)} = 1,95 \frac{kg}{m^3}$$

[4] Dies ist die Zeit, für die gilt $\mid y(t) - y(\infty) \mid \leq 3\%$ des stationären Endwertes der Streckenübergangsfunktion.

Viskosität

Für die dynamische Viskosität η bei 20^0C gilt:

$$\eta_{Ar} = 222\mu P$$
$$\eta_{DME} = 91\mu P$$

$$\Rightarrow \eta_{Ar/DME(50/50)} = 156,5\mu P = 15,7 * 10^{-6}\frac{Ns}{m^2}$$

Die kinematische Viskosität ν beträgt dann:

$$\Rightarrow \nu_{Ar/DME(50/50)} = \frac{\eta_{Ar/DME(50/50)}}{\rho_{Ar/DME(50/50)}} = \frac{15,7*10^{-6}}{1.95}\frac{m^2}{s} = 8,05 * 10^{-6}\frac{m^2}{s}$$

2.3.2 Drücke

Erwartete Schwankungen des Atmosphärendruckes

Folgende Schwankungen des Atmosphärendrucks sind realistische Annahmen:

- **langfristige Schwankungen:** Über ein Jahr können Schwankungen des Außendrucks von 970 bis 1030 mbar eintreten. Diese resultieren vor allem aus Wetterveränderungen (Hoch- / Tiefdruckgebiete).
- **kurzfristige Schwankungen:** Kurzfristige Schwankungen (Luftzug oder Schlagwetter) bewegen sich im Bereich von maximal ± 10 mbar.

Relativdruckregelung

Die grundsätzlich zu beantwortende Frage ist, ob man eine Absolutdruck- oder eine Relativdruckregelung in den Nachweiskammern anstrebt.

Die Gasverstärkung ist abhängig von der mittleren freien Weglänge, die die durch Ionisation erzeugten Elektronen zurücklegen, bevor sie erneut mit Atomen des Gases zusammenstoßen. Bei steigendem Druck in der Kammer, d.h. bei kleiner werdender mittlerer freier Weglänge, wird die Gasverstärkung kleiner, da den Elektronen nicht mehr genug Zeit bleibt, die für die Ionisation weiterer Atome notwendige Energie aufzunehmen. Die Gasverstärkung ist also druckabhängig[5]. Druckschwankungen wirken sich direkt auf den gain aus, der wiederum die Kammereffizienz beeinflußt.
Wegen der aufgezeigten Abhängigkeiten würde man eine Absolutdruckregelung vorziehen, da dann gewährleistet wäre, eine konstante Gasverstärkung in den Kammern zu erhalten.

Aufgrund ihrer Bauweise - wichtig ist hierbei vor allem der 0,4 mm dünne Glas-Wafer (Abbildung 1.5) - tolerieren die Kammern aber lediglich Schwankungen des Relativdruckes von ungefähr ± 1 mbar (siehe Kapitel 2.3.7). Die oben angenommenen längerfristigen Schwankungen des Atmosphärendruckes würden demnach bei einer Absolutdruckregelung - z.B. auf 1013 mbar - eine Zerstörung der Kammern zur Folge haben. Schon typische, kurzfristige Schwankungen des Außendrucks (± 10 mbar) würden die Kammern bei einer Absolutdruckregelung nicht verkraften.

[5]Experimentell stellt man eine prozentuale Änderung der Gasverstärkung in Ar/DME von etwa 8% bei einer Druckänderung um 1% fest [VISBECK].

Man ist also bauartbedingt gezwungen, eine Relativdruckregelung durchzuführen und dabei Schwankungen des gains in Kauf zu nehmen.

Drücke im System

Eine schematische Darstellung des Druckverlaufes[6] im Gassystem zeigt die Abbildung 2.7. Das Puffergefäß in der Gasmischanlage (siehe Kapitel 2.3.3) dient unter anderem dazu, ein möglichst konstantes Druckpotential[7] herbeizuführen, das für die Regelung benötigt wird. Von diesem Potential aus fällt der Druck in den Edelstahlleitungen, die von der Gashütte zum Trailer laufen, kontinuierlich auf ein bestimmtes Niveau. Der im Trailer stehende Massenflußregler erzeugt durch das enthaltene Regelventil einen Druckabfall, dessen Größe von der Öffnung des Ventils abhängt. Die Verbindung zu den Kammern und dann zurück zum Trailer wird durch Wellschläuche hergestellt, in denen wiederum ein kontinuierlicher Druckabfall aufgrund der Leitungswiderstände stattfindet. In den Kammern erreicht das Druckpotential Atmosphärendruck (Ursprung der Abbildung). Das Handventil auf dem Trailer, das die Pumpeneinwirkung steuert und verantwortlich ist für den Gasgesamtfluß, verursacht in der Rückleitung - wie der Massenflußregler in der Hinleitung - einen Potentialsprung. In der anschließenden Abgasleitung (Edelstahlrohr) zur Pumpe in der Gashütte sinkt der Druck wieder kontinuierlich und erreicht dann das Druckpotential, das von der Pumpe vorgegeben wird.

Der Vordruck im System muß so gewählt werden, daß trotz des Druckabfalls in den Leitungen ein so hoher Druck am Massenflußregler ansteht, daß dieser hinreichend schnell auf Veränderungen reagieren kann und somit die gewünschten Drücke im System jederzeit hergestellt werden können (siehe Kapitel 2.3.3).

Die Systempumpe muß ebenfalls so dimensioniert sein, daß trotz der Widerstände in den Leitungen, ein hinreichend niedriges Druckpotential geschaffen wird, um eine Regelung zu ermöglichen.

Exemplarisch sei im folgenden einerseits der maximal erwartete Druckabfall in den verwendeten Wellschläuchen berechnet und andererseits der Druckabfall in den Edelstahlleitungen [HYDRA].

- **Maximaler Druckabfall in den verwendeten 55 m langen DN8 Wellschläuchen:**[8]

  Die Berechnung des Druckverlustes $\triangle p$ erfolgt nach der Gleichung:

$$\triangle p_{Wellschlauch} = (\lambda * \frac{l}{d} + \zeta_b) * (\frac{\rho}{2}) * c^2$$

  mit: $\triangle p$ = Druckverlust in Pascal
  λ = Reibungszahl

[6] Es handelt sich bei dieser Darstellung um keine maßstabsgerechte Abbildung der Druckverhältnisse.

[7] Die Verwendung des Potentialbegriffes resultiert aus der Analogie von Gasflüssen zwischen den verschiedenen Komponenten eines Gassystems mit elektrischen Strömen in Schaltungskreisen.

[8] Hierbei handelt es sich um die Verbindung zwischen dem Trailer und der Kammerstation.
Die Nennweite (DN) ist eine Kenngröße für Rohrleitungssyteme. Ihr Zahlenwert entspricht annährend dem Innendurchmesser in Millimeter.

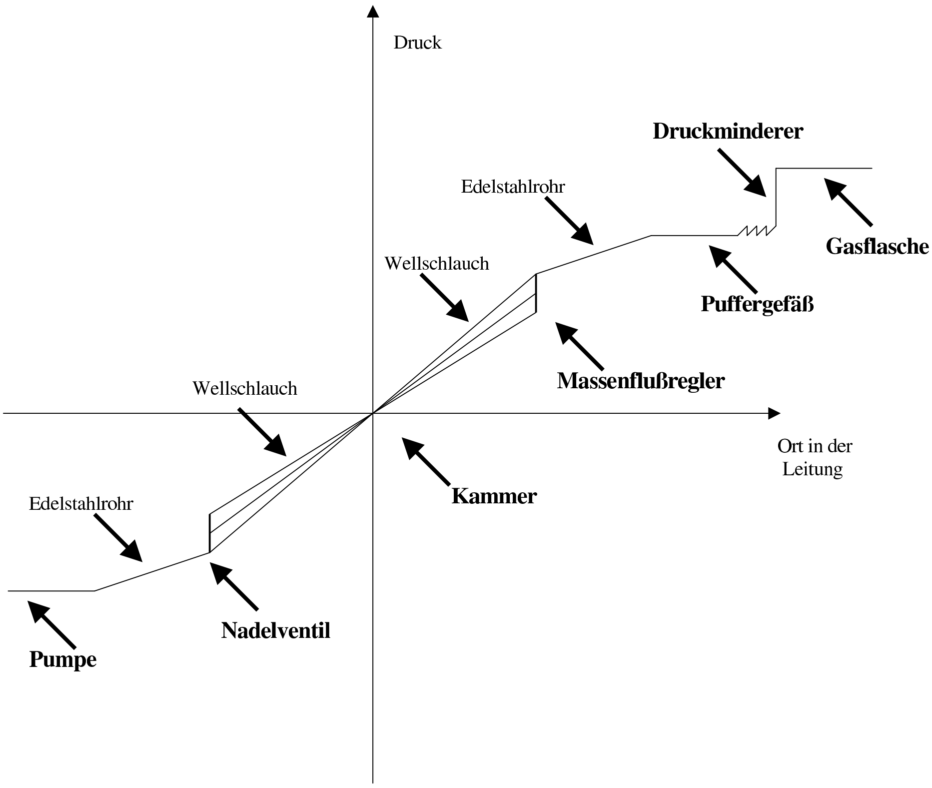

Abb. 2.7: Schematische Darstellung des Druckverlaufes im Gassystem

l	= reine Schlauchlänge in mm (= 55000)
d	= Schlauchinnendurchmesser in mm (= 8,3)
ζ_b	= Widerstandszahl im gebogenen Zustand
ρ	= Dichte des Gases in kg/m^3 (= 1,95)
c	= Strömungsgeschwindigkeit in m/s

Der Maximalgesamtfluß F bei einem Sollwert von 20 ml/min pro Kammer und einem Paket mit 16 Kammern errechnet sich zu:

$$F = 16 * 20\frac{ml}{min} = 320\frac{ml}{min} = 5,3\frac{ml}{sec} = 5,3 * 10^{-6}\frac{m^3}{sec}.$$

Die verwendeten Wellschläuche besitzen folgenden Querschnitt A:

$$A = \pi * (\frac{d}{2})^2 = 5,41 * 10^{-5}m^2.$$

Damit errechnet sich eine Strömungsgeschwindigkeit c von:

$$\Rightarrow c = \frac{F}{A} = 0,1\frac{m}{s}$$

Für die Reynoldszahl ergibt sich folgender Wert:

$$Re = \frac{c*d}{10^3*\nu} \approx 100$$

Mit dem Wert der Reynoldszahl ermittelt man aus einem Diagramm ([HYDRA] Seite 358) eine Reibungszahl $\lambda = 0,1$.

Die spezifische Widerstandszahl ζ ergibt sich, bei einem angenommenen mittleren Biegeradius r=200 mm für die verwendeten DN8-Schläuche zu $\zeta = 4$.

Die Widerstandszahl im gebogenen Zustand errechnet sich bei einem Gesamtumlenkwinkel $\alpha = 1260^0$ des Schlauches zu:

$$\zeta_b = \zeta * \frac{\alpha}{180^0} = 28.$$

Somit ergibt sich folgender **Druckverlust** in einem der 55 m langen Wellschläuche:

$$\Rightarrow \triangle p_{Wellschlauch} = 6,7 Pascal = \mathbf{67 \mu bar}$$

- **Maximaler Druckabfall in der 120 m langen Edelstahlleitung:**[9]

  Die Berechnung des Druckverlustes $\triangle p$ erfolgt prinzipiell nach derselben Gleichung wie schon bei den Wellschläuchen. Der Anteil der Gleichung, der die Biegung der Leitungen berücksichtigt, kann hierbei allerdings vernachlässigt werden. Die Reibungszahl kann auf einen Wert von $\lambda = 0,1$ (laminarer Bereich) abgeschätzt werden.

  Der Maximalgesamtfluß F bei einem Sollwert von 20 ml/min pro Kammer und insgesamt 184 Kammern errechnet sich zu:

$$F = 184 * 20\frac{ml}{min} = 3680\frac{ml}{min} = 61.3\frac{ml}{sec} = 61,3 * 10^{-6}\frac{m^3}{sec}.$$

  Die verwendeten Edelstahlleitungen (d = 8 mm) besitzen folgenden Querschnitt A:

$$A = \pi * (\frac{d}{2})^2 = 5 * 10^{-5} m^2.$$

  Damit errechnet sich eine Strömungsgeschwindigkeit c von:

$$\Rightarrow c = \frac{F}{A} = 1,2\frac{m}{s}$$

  Somit ergibt sich folgender **Druckverlust** in der 120 m langen Edelstahlleitung:

$$\Rightarrow \triangle p_{Rohr} = (\lambda * \frac{l}{d}) * (\frac{\varrho}{2}) * c^2 = 2106 Pascal = \mathbf{21\ mbar}$$

Sowohl in den Edelstahlleitungen als auch in den Wellschläuchen handelt es sich um eine laminare Strömung.

[9]Verbindung zwischen dem Bereitstellungsraum und dem Trailer.

2.3.3 Volumina

Kammervolumina

Das Volumen einer Kammer beträgt etwa 300 ml. Bei 184 maximal einzubauenden Kammern ergibt sich somit ein Gesamtkammervolumen von 55 Litern.
Der kleinste Gaskreislauf (8 Kammern) hat ein Kammervolumen von 2,4 Litern, der größte (16 Kammern) von 4,8 Litern zu versorgen.

Rohrvolumina

Für die Regelung relevant ist die Verbindung zwischen dem Gasrack im Trailer und den Kammern. Die Gasverbindung wird durch l = 55 m lange Ringwellschläuche (siehe 3.12) sichergestellt. In das zu regelnde Gesamtvolumen geht damit zusätzlich folgendes Rohrvolumen des Schlauches ein (Querschnittsfläche des Schlauches A = $5,41 * 10^{-5} m^2$ (siehe oben)):

$$\Rightarrow V_{Schlauch} = A * l \approx 3 Liter$$

(pro Verbindung zwischen Trailer und Experiment)

Puffergefäß der Gasmischanlage

Das Puffergefäß in der Gasmischanlage besitzt ein Volumen von 30 Litern. Es dient dazu, in der Gasversorgung ein möglichst konstantes Druckpotential herzustellen. Außerdem führt der Einbau solch einer Pufferung dazu, daß die Schwingungszeit T_1 in der Gasmischanlage möglichst groß wird (siehe hierzu Unterkapitel 2.3.4). Ein weiterer Punkt besteht darin, daß durch den Einsatz dieses Gefäßes mögliche Schwankungen in der Gasmischung weggepuffert werden, die bei direkter Nutzung des - durch zwei Massenflußregler hergestellten - Gemisches auftreten könnten.

Gasvolumenstrom

Die hier zu klärende Frage ist, wie groß der maximale Volumenstrom ist, den das Gassystem liefern muß, um kurzfristige Schwankungen des Atmosphärendrucks ausgleichen zu können.

Um typische, während der Regelung auftretende, Druckschwankung von 10 μbar[10] bei einem Kammervolumen von 300 ml in 2 Sekunden[11] auszugleichen, benötigt man einen Gasfluß von $300 * 10^{-5} * \frac{ml}{2sec}$. Dies ergibt bei maximal 184 Kammern einen im Extremfall benötigten Fluß von etwa $0,28 \frac{ml}{sec} = 17 \frac{ml}{min}$.
Damit der Massenflußregler solch eine Flußschwankung jederzeit bewältigen kann, muß eine ausreichend große Druckdifferenz am Massenflußregler herrschen.
Die Regler sind so konzipiert, daß sie den Maximalfluß (500 ml/min) überhaupt nur liefern können, wenn zwischen dem Einlaß und dem Auslaß des Massenflußreglers eine Druckdifferenz von 500 mbar (500 mbar Einlaß- und 0 bar Auslaßdruck) herrscht. Eine Steigerung des Flusses von Null auf den Maximalwert benötigt etwa 5 Sekunden.
Im Prototypsystem beträgt die Differenz etwa 170 mbar, d.h. es kann höchstens ein Fluß von ungefähr 170 ml/min erreicht werden. Gemäß Labormessung ist eine Steigerung aus dem

[10]Die Werte resultieren aus Erfahrungen mit Regelungen in Laborversuchen. Auch die Tests des Prototypsystems ergaben diese typischen Schwankungswerte (siehe Kapitel 6.2.1).
[11]Der Zeitfaktor von 2 Sekunden ist eine realistische Abschätzung der Zeit, in der das Gassystem diese Schwankungen ausgleichen muß, um die Regelung problemlos aufrechtzuerhalten.

geschlossenen Zustand auf diesen Maximalwert in etwa 2 Sekunden möglich.
Eine Schwankung um 17 ml/min kann vom System also problemlos im Zeitbereich von 200 Millisekunden bewältigt werden.

2.3.4 Regelschwingungen

Durch das Zusammenspiel zwischen Druckdose, PID-Regler und Massenflußregler kommt es im Regelsystem zu Schwingungen. Die Stärke wird dabei durch den Einsatz eines PID-Reglers deutlich reduziert (siehe Kapitel 2.2). Dieser Schwingung kann man eine Zeitkonstante T_2 zuordnen.

Diese Schwingung wirkt sich auch auf die Gasmischanlage (enthält einen Software-PID-Regler) aus. Die Variation im Gasvolumenbedarf führt auch hier zu einem schwingenden System mit einer Zeitkonstante T_1. Die Auswirkungen eines höheren Gasbedarfes wirken sich erst mit einer Verzögerung (100 m Leitungslänge) in der Gasmischanlage aus.

Insgesamt liegen also zwei sich gegenseitig beeinflussende Systeme (Abbildung 2.8) vor. Je kleiner nun der Quotient T_2/T_1, desto besser ist es für die Funktionsweise der Regelung. Um die Zeitkonstante T_1 möglichst groß zu machen, wird das Puffergefäß in der Mischanlage benötigt.

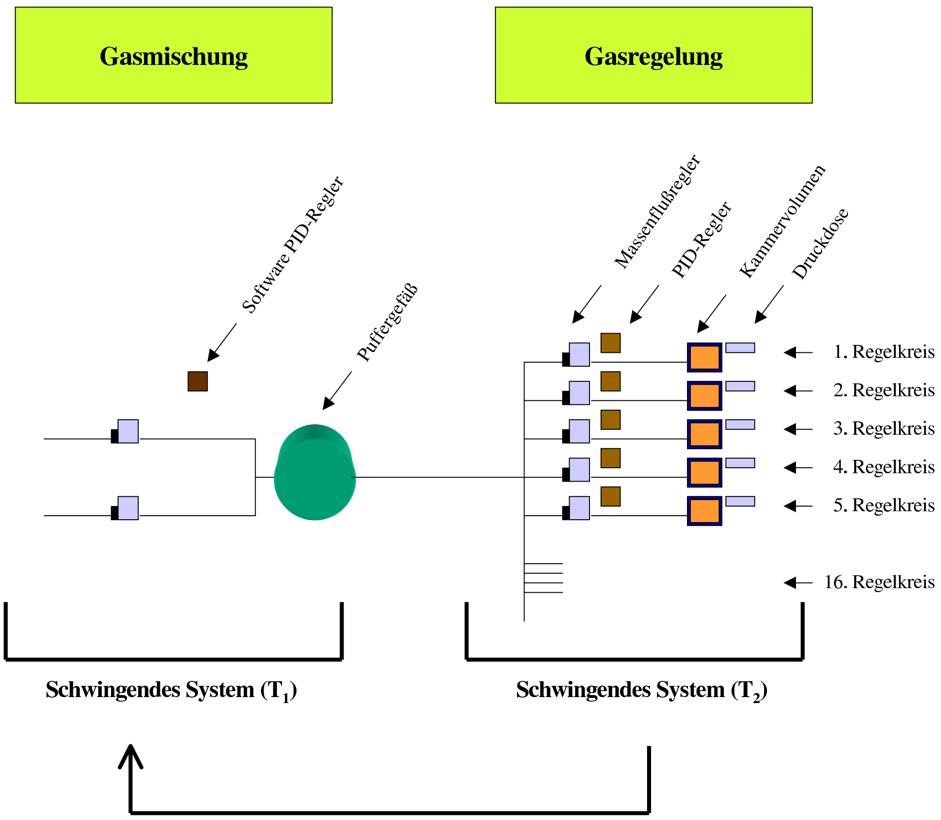

Abb. 2.8: Die zwei auftretenden Regelschwingungen

2.3.5 Höhenunterschiede

Die bestehenden Höhenunterschiede im System sind für die Funktionsweise der Regelung nicht relevant, da die hydrostatischen Drücke sehr viel geringer sind als die Flaschendrücke. Man benötigt aber Berechnungen, um die exakten Werte[12] der Drücke zu bestimmen.

Zwischen den Positionen der Druckdosen im System und der Mitte der Kammer liegt eine Höhendifferenz von 1,65 m (siehe Abbildung 2.2). Daraus resultiert ein Druckunterschied von:

$p_{innen} = \rho_{Ar/DME} * g * h$
$p_{außen} = \rho_{Luft} * g * h$

$$\Rightarrow \triangle p = p_{innen} - p_{außen} = (\rho_{Ar/DME} - \rho_{Luft}) * g * h = (1,95 - 1,3) * 9,81 * 1,65 N/m^2 = 10,5 Pa = 105 \mu bar \approx 100 \mu bar$$

Der sich ergebende hydrostatische Druck beträgt 100 μbar. Um diesen Wert müssen alle Werte der Druckdosen reduziert werden, um den wahren Druck in den Kammern zu bestimmen.

2.3.6 Flüsse

Den optimalen Wert des Flusses einstellen heißt, einen Kompromiß zwischen den folgenden widersprüchlichen Forderungen zu finden:

- So viel Fluß wie möglich ist gut für die performance der Kammern. Zum Beispiel würden sehr geringe Flüsse bei den hohen Strahlungsraten bei Hera-B mit großer Wahrscheinlichkeit zu einem Alterungsprozeß (Ageing-Effekt) führen, der durch das Zählgas selbst hervorgerufen wird. Hohe Flüsse hingegen spülen die durch das DME in Verbindung mit der Strahlung entstehenden, schädlichen Crackprodukte schnell aus der Kammer.

- Natürliche Limits müssen beachtet werden. Einerseits heißt das, aus ökonomischer Sicht nicht beliebig viel Gas zu verbrauchen und andererseits, Druckrestriktionen (siehe Kapitel 2.3.7) zu erfüllen.

In Laborversuchen wurden gute Erfahrungen gemacht mit einem Fluß pro Kammer von 15-20 ml/min. Um diesen Wert zu erhalten, muß im Einlaßverteiler (siehe hierzu Abbildung 2.9) an der Kammer ein Relativdruck von etwa 2 mbar herrschen. Im Auslaßverteiler herrscht dann der betragsmäßig etwa gleich große Unterdruck. Dieser Druck ist aus Sicherheitsgründen (kein zu hoher Druck vor den empfindlichen Kammern) noch zu tolerieren, da die Ein- und Auslaßverteiler nur über sehr dünne Kapillaren (1 mm Innendurchmesser, 50 cm Länge) mit den Kammern verbunden sind und sich daraus ein sehr großer Druckabfall ergibt.
Die Kosten des Gasverbrauches sind in einem vertretbaren Rahmen.
Um ein Kammervolumen (300 ml) bei diesem Fluß komplett auszutauschen, benötigt man etwa 15 min[13].

Beim Anfahren des Systems nach einem längeren Stillstand kommt es darauf an, die in die Kammer diffundierte Luft wieder vollständig zu verdrängen. Ein Volumenaustausch verdünnt

[12] Exakt heißt in diesem Zusammenhang, daß die Werte um den hydrostatischen Druck korrigiert werden.
[13] Bei dieser Abschätzung sind eventuell in der Kammer entstehende Verwirbelungen, die den Gasaustausch behindern, nicht berücksichtigt.

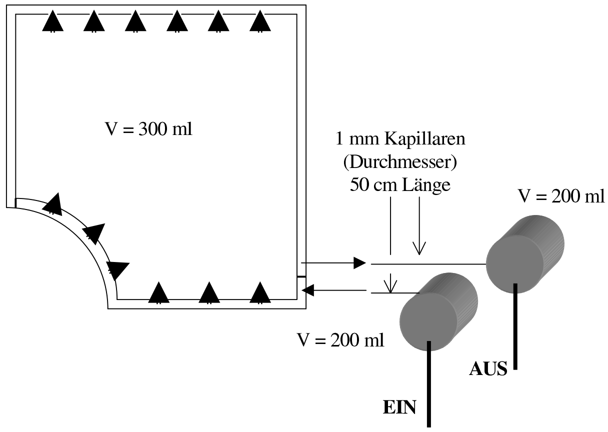

Abb. 2.9: Die Gasverteilervolumen an der Einlaß- und der Auslaßseite der Kammern

dabei das alte Gas um etwa einen Faktor e^{-1}. Um also z.B. eine Verdünnung des in die Kammer diffundierten Gases um einen Faktor 10^{-6} zu erreichen, benötigt man folglich etwa 16 Volumenaustausche. Dies nimmt ungefähr 4 Stunden[14] in Anspruch.

Der Gesamtgasverbrauch aller 184 Kammern pro Tag (bei einem Sollfluß von 15 ml/min pro Kammer) berechnet sich zu:

$$15\frac{ml}{min} * 1440\frac{min}{Tag} * 184 = 4000\frac{lGas}{Tag} = 4\frac{m^3Gas}{Tag}$$

Bei einem Mischungsverhältnis von 50% DME und 50% Argon ergibt dies einen DME-Verbrauch von:

$$= 2\frac{m^3DME}{Tag} = 4,2\frac{kgDME}{Tag}$$

Je nach Laufzeit des Experimentes im Jahr (8 - 9 Monate) ergibt sich ein DME-Verbrauch des ITR von 1 - 1,2 $\frac{t}{Jahr}$.

2.3.7 Kammersicherheit

Die Kammersicherheit umfaßt vor allem folgende Punkte:

- Bruch des Glases
- Verformungen der Kammern
- Ageing in der Kammer

Bruchgefahr

Die erste vom System zu erfüllende Forderung ist, daß der Relativdruck in den Kammern keine Größen erreichen darf, die zu einem Bruch führen, d.h. daß die Kammern höchstens mit Schwankungen im Bereich von $\pm(3$ - $5)$ mbar im Vergleich zum Atmosphärendruck belastet

[14] Bei dieser Abschätzung werden wiederum auftretende Verwirbelungen im Gasvolumen nicht berücksichtigt.

werden sollten.
Diese Erkenntnisse resultieren aus Laborversuchen mit Kammern eines anderen Typs (Vollglas-Kammern):
Dabei ergaben sich tolerable Drücke von bis zu 5 mbar Über- und -4 mbar Unterdruck [DREIS]. Aufgrund ihrer Bauweise haben die MSGC-Kammern noch höhere theoretische Bruchfestigkeiten aufzuweisen. Wegen möglicher Verspannungen kann die Bruchgrenze aber im Einzelfall erheblich kleiner sein. Deshalb fordert man eine Höchstbelastung von ± 1 mbar im Vergleich zum Atmosphärendruck.
Um dies stets zu gewährleisten, wird eine Relativdruckregelung eingesetzt, und die Grenzen für das Auslösen eines Druckalarms werden auf $\pm$ 300 μbar eingestellt. Die Grenze wird nochmals erheblich niedriger gelegt als es die Bruchfestigkeit fordert, um auch größere Verformungen (siehe unten) möglichst ausschließen zu können.

Verformungen

Die zweite Forderung ist die, daß sich die Kammern durch die Gasfüllung möglichst nicht verformen sollten.
Eine Verformung der Kammern hat eine Änderung der Driftfeldstärke[15] zur Folge. Dies wirkt sich sofort auf die Kammer-performance aus und muß deshalb vermieden werden.
Die Relativdruckregelung muß daher weit unterhalb der Bruchgrenzen stattfinden (Schwankungen von etwa 300 μbar können toleriert werden).
Da die Regelung - wie in Kapitel 6 gezeigt wird - sogar noch wesentlich genauer ist, ergeben sich große Sicherheitsgrenzen. Selbst kurzfristige Spitzen in der Regelung sind erheblich niedriger als es zur Erfüllung der oben genannten Anforderungen bedarf.

Ageing

Die Gefahr des ageing wird durch einen hohen Fluß und durch Beachtung sämtlicher Reinheitsforderungen an die Komponenten des Gassystems (siehe Kapitel 3) stark eingeschränkt.

Warum wird überhaupt geregelt?

Folgende Alternativen sind möglich:

- Man könnte das Gas direkt am Detektor aus einer dicken Kapillare strömen lassen (Abbildung 2.10). So wäre ein Kammerdruck, der sich jederzeit nahe am Atmosphärendruck befindet, sichergestellt.

  Aus Sicherheitsgründen ist es jedoch untersagt, das Gas in die Experimentierhalle strömen zu lassen (Dimethylether ist leicht brennbar). Es besteht die Forderung, das Gas nach außen, d.h. ins Freie, herauszuführen.

- Beim Herausführen des Gases aus der Halle müssen etwa 20 m Höhenunterschied überwunden werden. Setzt man keine Pumpe ein, bedeutet dies, daß man das Gas gegen die Rohrwiderstände und gegen die sich ergebenden hydrostatischen Drücke pressen muß. In den Kammern müßten zu diesem Zweck mindestens 3 mbar Überdruck herrschen.

[15] Die Driftfeldstärke F(U,d) ist abhängig von der angelegten Spannung U und dem Abstand d zwischen dem Deckel und dem Wafer.

> Diese Tatsache ist nicht mit den oben genannten Bedingungen zur Kammersicherheit in Einklang zu bringen.

Daraus folgt, daß man gezwungen ist, sich mit Hilfe einer Pumpe ein zweites Druckpotential zu schaffen und dann den Druck in den Kammern aktiv auf den Atmosphärendruck zu regeln.

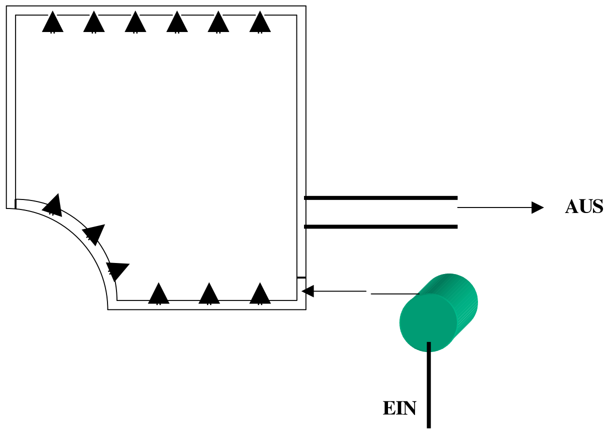

Abb. 2.10: Option einer Kammer mit großer Auslaßkapillare

2.3.8 Regelqualität

Wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, kommt es darauf an, den Druck in den Kammern auf Atmosphärendruck mit Schwankungen im Bereich nur einiger μbar zu regeln. Das System muß in der Lage sein, auf Schwankungen des Umgebungsdruckes sofort zu reagieren. Dies muß realisiert werden, obwohl es sich bei der vorliegenden Regelstrecke um eine *Regelstrecke mit Totzeit*[16] handelt.

2.3.9 Steuerungstechnische Anforderungen

Die Steuerung (Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) - siehe Kapitel 3.10) muß vor allem die Aufgabe erfüllen, möglichst große Sicherheit für den Betrieb der Kammern zu gewährleisten.
Sie überwacht zu diesem Zweck die Werte sämtlicher Messungen der Drücke und Flüsse im System und muß in der Lage sein, das System bei Überschreitung von Sicherheitsgrenzen selbständig in einen sicheren Zustand zu schalten. Die Schaltzeiten der SPS müssen dabei deutlich unter 1 Sekunde liegen, um den Zeitraum bis zum Erreichen eines sicheren Zustandes[17] nicht erheblich zu verlängern.

[16]Die sogenannte Totzeit resultiert aus den 55m langen Leitungen zwischen dem Massenflußregler und den Kammern. Veränderungen der Ventilöffnung des Reglers wirken sich somit erst mit einer gewissen Verzögerung aus.

[17]Diese Zeitspanne wird in erster Linie durch die Schaltzeiten der Pneumatikventile gegeben (siehe Kapitel 4.2.2)

Im endgültigen System muß die Steuerung etwa folgendende Anzahl an Meßwerten erfassen können:

- Digital: 120 Eingänge, 120 Ausgänge
- Analog: 150 Eingänge, 50 Ausgänge

Die Steuerung muß über umfangreiche Kommunikationsmöglichkeiten verfügen, um zum Beispiel eine Verbindung der Mischanlage mit der Regelung sicherzustellen (siehe Kapitel 5.6).

2.4 DESY-Sicherheitsanforderungen

Neben den gesetzlichen Vorschriften [DESY] müssen beim Betrieb mit brennbaren Gasen bei DESY weitere Forderungen erfüllt werden [DESIGN]. Die wichtigsten Anforderungen dabei sind:

- **Gasabsaugungen** müssen installiert werden, um möglicherweise austretendes Gas aus dem Hallenbereich abzusaugen.
- In allen Gasbereichen müssen **Gassensoren** vorhanden sein.
- Gas-Systeme müssen einen **NOT-AUS-Mechanismus** besitzen.
- **Inertisierung** der Systeme muß jederzeit möglich sein.
- Weiterhin wird eine **strikte Trennung von gasführenden- und Elektronikbereichen** gefordert[18], d.h. alle Bereiche in der Gasregelung und der Mischung, die Gaskomponenten oder Verschraubungen enthalten, müssen räumlich von anderen Systemkomponenten getrennt werden. So wird gewährleistet, daß eventuell austretende Gase nicht durch Kurzschlüsse der Elektronik entzündet werden können.
- Da es aber bei manchen der eingesetzten Geräte (Massenflußregler, Druckschalter und -sensoren) durch die notwendige Verkabelung nicht möglich ist, die Forderung nach der strikten Trennung vollständig zu erfüllen, ergeben sich **besondere Forderungen**, die im Kapitel 8.3.3 diskutiert werden.

[18] Diese Forderung bezieht sich auf die Nutzung von brennbaren Gasen.

Kapitel 3

Tests und Auswahl der Hardwarekomponenten

Die Abbildung 4.1 zeigt eine Übersicht über das Gesamtsystem des Jahres 1998. Der in diesem Kapitel beschriebenen Hardwareauswahl der in der Abbildung enthaltenen Komponenten lag folgende Vorgehensweise zugrunde:

Aufgrund der speziellen Erfordernisse des Experimentes (siehe Kapitel 2) wurden genaue Anforderungen an die zu beschaffenden Komponenten gestellt. Wurde ein geeigneter Kandidat gefunden, verzichtete man auf weitere Tests. Vergleichstests von vielen verschiedenen Möglichkeiten über einen längeren Zeitraum wurden demnach nicht durchgeführt.

Begründung: In einer kritischen Phase der Detektorentwicklung war aus Zeitgründen und Mangel an Personal keine andere Vorgehensweise möglich. Außerdem stellte es ein Problem dar, viele Testgeräte über einen längeren Zeitraum von den entsprechenden Firmen auszuleihen. Der Kauf einer erheblichen Anzahl von Geräten nur zu Testzwecken war aus finanzieller Sicht unmöglich.

Im Anhang D befindet sich eine Zusammenstellung der ausgewählten Hardware mit genauer Hersteller- und Produktbezeichnung.

3.1 Allgemeines

3.1.1 Anforderungen

An alle Geräte müssen hohe Anforderungen bezüglich folgender Punkte gestellt werden:

1. **Langzeitstabilität**

2. **Vibrationsunempfindlichkeit** im Bereich der Mischanlage.

3. **Unempfindlichkeit gegenüber großen Magnetfeldern**: Dies betrifft natürlich vor allem die Geräte, die in der Nähe der Kammer, d.h. im Experiment zum Einsatz kommen (Druckdosen, Pneumatikventile).

4. **schnelles Ansprechverhalten**

Außerdem bestand die Forderung, die Anzahl unterschiedlicher Geräte möglichst zu minimieren.

3.1.2 Auswahl des Gases für den Betrieb der Kammern und Konsequenzen für die Materialwahl

Im allgemeinen wird als Nachweisgas ein **Edelgas** gemischt mit einem sogenannten **Quencher**[1] genutzt.
Argon, das billigste Edelgas, alleine würde durch die in Prozessen entstehenden Photonen sehr schnell sehr viele Elektronen erzeugen: Die Photonen (große mittlere freie Weglänge) würden weitere Elektronen vor allem aus dem Kathodenmaterial auslösen. Die Folge wäre eine zu geringe Durchbruchspannung und ein häufiges Nachpulsen. Letzteres würde eine schlechtere Ortsauflösung bedeuten, da die zusätzlichen Elektronen nicht mehr auf das nachzuweisende Teilchen zurückzuführen wären.
Der Zusatz eines Quenchers führt dazu, daß entstehende Photonen wieder absorbiert werden können, ohne weitere, für den Nachweis wichtige Prozesse, zu beeinflussen. Dimethylether wurde gewählt, da er eine hohe Primärionisation (doppelt so groß wie die des Ar) besitzt, strahlungsresistent ist und keine Probleme mit Ablagerungen bekannt sind (Polimerisation).

Ageing-Labortests mit Kammern in Heidelberg und ähnliche Tests am CERN ergaben, daß beim Betrieb mit **Ar/DME (50/50)** folgende Anforderungen erfüllt werden müssen:

Alle gasführenden Komponenten der in Frage kommenden Geräte dürfen nur aus den Materialien Edelstahl, Kel-F (PCTFE) oder Kalrez bestehen, da die aufgeführten Materialien nicht von DME angegriffen werden. Schon geringe Verunreinigungen mit Ausgasprodukten (z.B. Teflondämpfen) würden zu einer irreparablen Schädigung der Kammern führen.
Ebenfalls dürfen keinerlei kohlenwasserstoff- oder ölhaltige Stoffe in das System gelangen. Dies hätte eine Zerstörung der Nachweiskammern durch Alterungseffekte zur Folge.

Die Empfindlichkeit vieler Materialien bei Nutzung von DME über einen längeren Zeitraum führt dazu, daß nur explizit getestete Materialien verwendet werden dürfen.

3.2 PID-Regler

Der einzusetzende Regler stellt das "eigentliche Herzstück" des Gaskreislaufes dar. Aus seinem Input-Wert, dem Druck in der Kammer, bestimmt er ständig einen Output-Wert, den Soll-Fluß des Massenflußreglers. Der Regler befindet sich im Elektroniktrailer (siehe Abbildung 2.2).

Folgenden Anforderungen muß der Regler genügen:

- Die **Ausgabegröße des Reglers sollte ein Analogwert sein**, damit dieser direkt verarbeitet werden kann.
- Als Algorithmus sollte in dem Gerät ein **PID**-Regler zum Einsatz kommen. Der Regler erhält seinen Namen aus der Tatsache, daß der Algorithmus proportionale, integrale

[1] Ein Quencher (deutsch: Löschgas) ist ein Molekülgas, das über viele inelastische Photonenwirkungsquerschnitte (Vibrations- und Rotationsniveaus) verfügt. So können - aus Prozessen stammende - Photonen absorbiert werden. Dadurch reduziert der Quencher vor allem das Risiko von elektrischen Durchbrüchen.

und differentielle Anteile enthält (zur Theorie der PID-Regelung siehe Kapitel 2.2).

- Eine **LED-Anzeige** ist wünschenswert, um den Ist- und den Sollwert zusätzlich darzustellen und so eine weitere unabhängige Möglichkeit zu haben, die Werte zu beobachten.
- Der Kompaktregler sollte eine **serielle Schnittstelle** aufweisen, über die das Gerät konfiguriert, parametrisiert, bedient und beobachtet werden kann. Auf diese Schnittstelle soll später der MODBus (siehe Kapitel 5.3.1) zugreifen.
- Ein **Selbsteinstellmechanismus** des Reglers ist notwendig.
- Der Regler muß **Relais** besitzen, die er selbständig schalten kann, wenn der Ist-Wert vorher eingegebene Grenzen überschreitet.
- Ebenfalls sollte die Möglichkeit bestehen, den Regler **von außen einzuschalten** und zwar nicht über den Busanschluß, sondern über Relais. Dadurch ergibt sich eine geringe Abhängigkeit von hochintegrierten Systemen.
- Ein vom Rechner und der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) [siehe Kapitel 3.10] **autarker Betrieb** muß möglich sein. Der Regler kann dann prinzipiell auch bei Ausfall der SPS weiterlaufen. Dies ist auch der Grund, warum ein in die SPS integrierter Regler nicht in Betracht kam.
- **Preisgünstigkeit.**
- **Schaltschrankeinbau** muß möglich sein.

Der Regler wurde anhand einer Empfehlung der Elektronik Fachzeitung ELRAD [ELRAD] angeschafft und auf seine Eignung im projektierten System hin erprobt.
Die Zeitschrift untersuchte sieben universell selbsteinstellende Kompaktregler. Neben der Selbsteinstellung stand der Anfahrvorgang, die Regeleigenschaften für Standardaufgaben und die Bedienbarkeit der Geräte im Mittelpunkt.

Die den Gegebenheiten bei Hera-B am nächsten kommende getestete Regelstrecke ist die P-Strecke 3. Ordnung mit Totzeit.
Die Ordnungszahl gibt dabei Auskunft, wieviel speichernde Glieder in einer Strecke hintereinander auftreten. Totzeiten treten dann auf, wenn ein Stofftransport zwischen dem Stellglied - also dem Punkt, an dem der Regler mit seiner Stellgröße eingreift - und dem Fühler für die Regelgröße auftritt. Im Fall des Gassystems sind diese beiden Punkte der Massenflußregler (Trailer) und die Druckmessung in der Kammer (Experiment). Dazwischen liegen etwa 55 m Leitungen, durch die das Gas gespült werden muß, bevor eine Auswirkung erkennbar wird. Solche Strecken gehören zu den schwierigsten Regelaufgaben.

Bei Regelung der angesprochenen Teststrecke schließt der getestete "Commander 300" von ABB als Testsieger ab. Er erhält bei dieser Regelstrecke die Note "sehr gut". Zusätzlich erfüllt er alle weiteren oben genannten Kriterien.

Der Commander 100 von ABB (Abbildung 3.1) [ABB] ist die preisgünstigere Alternative zum Testsieger. Er besitzt zwar einige, für die Zwecke des Gassystems allerdings nicht wichtige, Funktionen weniger, arbeitet aber sonst nach den gleichen Prinzipien. Nach ausgiebigen Tests im Institut (siehe Kapitel 3.5), fiel die Wahl auf den Commander 100.

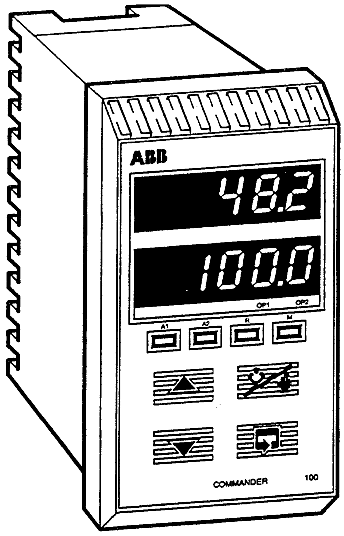

Abb. 3.1: Der ausgewählte PID-Regler der Firma ABB

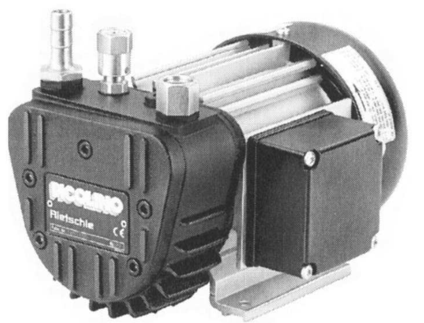

Abb. 3.2: Die Systempumpe des endgültigen Systems der Firma Rietschle

3.3 Systempumpe

Damit bei den niedrigen Relativdrücken, die in den Kammern herrschen sollen, überhaupt eine Regelung zustandekommen kann, muß man an der Auslaßseite eine Pumpe einsetzen. Durch ihren Einsatz entsteht ein zweites Druckpotential (ca. -200 mbar Unterdruck), so daß eine Regelung möglich wird. Die eingesetzte Pumpe hat ihren Standort im Mischraum.

Die zum Einsatz kommende Pumpe muß einem hohen Reinheitsanspruch genügen, damit durch Rückdiffusion keinerlei Fremdstoffe in die empfindlichen Kammern gelangen können. Sie muß insbesondere **vollkommen ölfrei**, **frei von Teflondichtungen** und **frei von Elastomeren** (außer Kalrez) sein.

Diese Bedingungen erfüllt die VTE PICOLINO 3 der Firma Rietschle (Abbildung 3.2) nach einer Modifikation (Kohledichtring und Staubfilter statt Teflondichtring). Es handelt sich dabei um eine trockenlaufende Drehschieber-Vakuumpumpe mit einem maximalen Saugvermögen von 3,5 m^3/h und einem maximalen Endvakuum von 150 mbar (absolut).
Durch das nachträgliche Einfügen eines Ventils (Auslöseschwelle 200 mbar Unterdruck, d.h. 800 mbar absolut) wird das maximale Endvakuum erheblich reduziert. Dies bringt zusätzliche Sicherheit. Wird die Auslöseschwelle des Ventils erreicht, strömt Stickstoff in die Pumpe. Somit kann kein explosionsfähiges Gemisch mit Dimethylether entstehen. Ein weiteres, werksseitig in die Pumpe integriertes Ventil, das bei einem Absolutdruck von 150 mbar normalerweise Luft ansaugen würde, ist an die Stickstoffzuführung angeschlossen. Dies ist eine zusätzliche Sicherung, die bei Versagen des nachträglich eingefügten Ventils zum Tragen kommt. Der Motorschaltkasten wird ebenfalls aus Sicherheitsgründen mit Stickstoff gespült. Die Abbildung 3.3 stellt das Anschlußprinzip der Pumpe dar.

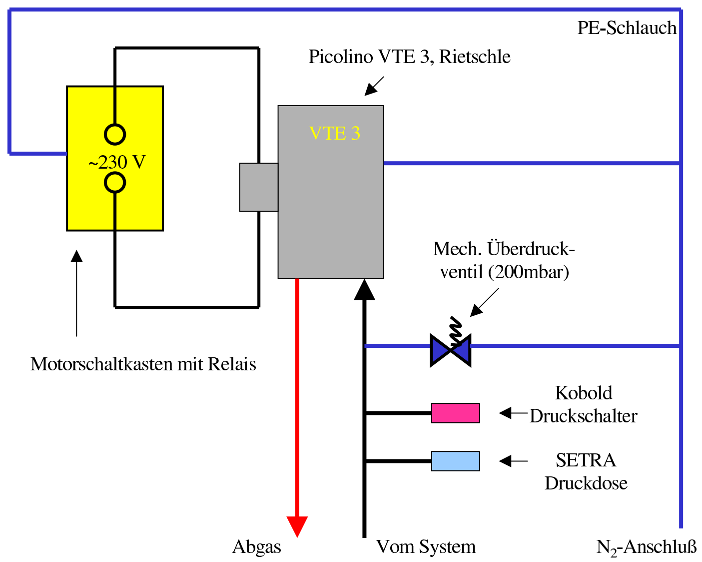

Abb. 3.3: Anschluß der Systempumpe (Zeichnung: H.-B. Dreis)

3.4 Massenflußregler

Der Massenflußregler reguliert die in die Kammer fließende Gasmenge. Die Sollvorgabe erhält er dabei vom PID-Regler, der diesen Wert aus der Differenz von Ist- und Sollwert des Kammerdruckes ermittelt. Der Einsatzort des Massenflußreglers ist der Elektroniktrailer.

Zur Auswahl standen drei Alternativen:

(1) Hastings-Massenflußregler	Typ HFC-202	(20 ml/min)	(**Hastings**)
(2) MKS-Massenflußregler	Typ 1479A-15206	(20 ml/min)	(**MKS_new**)
(3) MKS-Massenflußregler	Typ 1359CJ-00020SK	(20 ml/min)	(**MKS_old**)

Die Wahl des Hastings-Massenflußreglers [HASTINGS] für diesen Auswahltest war auf die Eignung laut Herstellerangaben, die Wahl der MKS-Massenflußregler auf die langjährigen Erfahrungen mit Reglern dieser Firma im Physikalischen Institut, zurückzuführen.

3.4.1 Aufbau des Teststandes

Die drei Massenflußregler wurden im Parallelbetrieb (Testaufbau in Abbildung 3.4 dargestellt) über zehn Tage - die dargestellten Meßergebnisse beziehen sich exemplarisch auf die ersten 5 Tage - unter den folgenden Bedingungen getestet:

Flußsollwert:	7 ml/min
Vordruck:	1bar
Hinterdruck:	0 bar
Gas:	Dimethylether (DME)

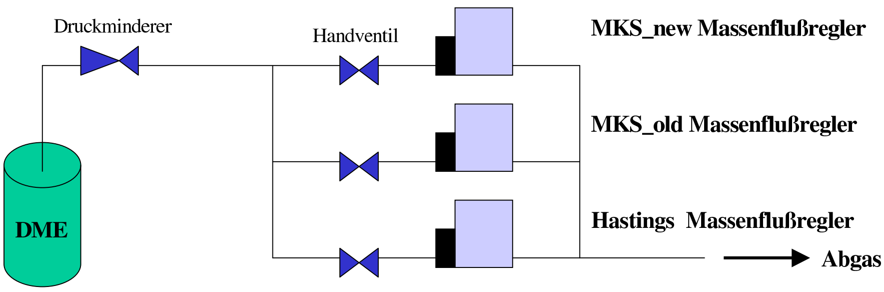

Abb. 3.4: Massenflußregler-Testaufbau

3.4.2 Messungen der Konstanz im Laufverhalten

In der Abbildung 3.5 ist der gemessene Flußverlauf der beiden MKS-Massenflußregler, über die gesamte aufgezeichnete Meßdauer hinweg, dargestellt. Man erkennt, daß der MKS_old-Massenflußregler unter diesen speziellen Bedingungen (Betrieb mit DME) schon nach ungefähr 5 Stunden den geforderten Fluß nicht mehr liefern kann (siehe hierzu auch den zeitlichen Ausschnitt in Abbildung 3.6). Dieses Phänomen wurde schon früher bei diesem Massenflußreglertyp im DME-Betrieb beobachtet [DREIS]. In anderen Gasen hingegen ist dieser Effekt noch nie beobachtet worden. Zudem registrierte man eine starke Erwärmung dieses Reglers nach 5 Stunden Regelzeit.
Der MKS_old-Massenflußregler schied deshalb aus den für das Gassystem möglichen Reglern aus und wird im folgenden nicht mehr betrachtet.

Die Abbildung 3.7 zeigt den Verlauf der Flüsse der zwei Regler-Alternativen, die noch verbleiben. Zur Übersichtlichkeit wird eine Darstellung mit zwei Flußachsen gewählt.
Während zu Beginn der Studien verschiedene Erschütterungstests durchgeführt wurden, wurde ab der vierzigsten Stunde versucht, die Massenflußregler möglichst nicht mehr zu beeinflussen. In der Abbildung 3.8 ist dieser Bereich gesondert aufgetragen.

Man erkennt (Abbildung 3.8), daß der MKS_new-Massenflußregler größere Schwankungen im Konstanzverhalten zeigt (± 0,1 ml/min) als derjenige der Firma Hasting (0,05 ml/min). Der Hastings zeigt dabei außerdem ein deutlich ruhigeres Laufverhalten als der MKS_new. Zusätzlich zu den größeren Schwankungen werden beim Gerät der Firma MKS gelegentliche (im Abstand von mehreren Stunden auftretende) Schwankungen um bis zu 0.5 ml/min sichtbar, die beim Hastings-Massenflußregler deutlich geringer und seltener sind.

3.4.3 Messungen der Erschütterungsfestigkeit

Um die Erschütterungsfestigkeit[2] der Massenflußregler einzuschätzen, wurden in den ersten 40 Stunden mehrere Tests durchgeführt.

[2]Vor allem im Bereich der Mischanlage können Vibrationen auftreten, da hier auch die beiden, im System zum Einsatz kommenden Pumpen, untergebracht werden. Die Erschütterungstests sind deshalb erforderlich.

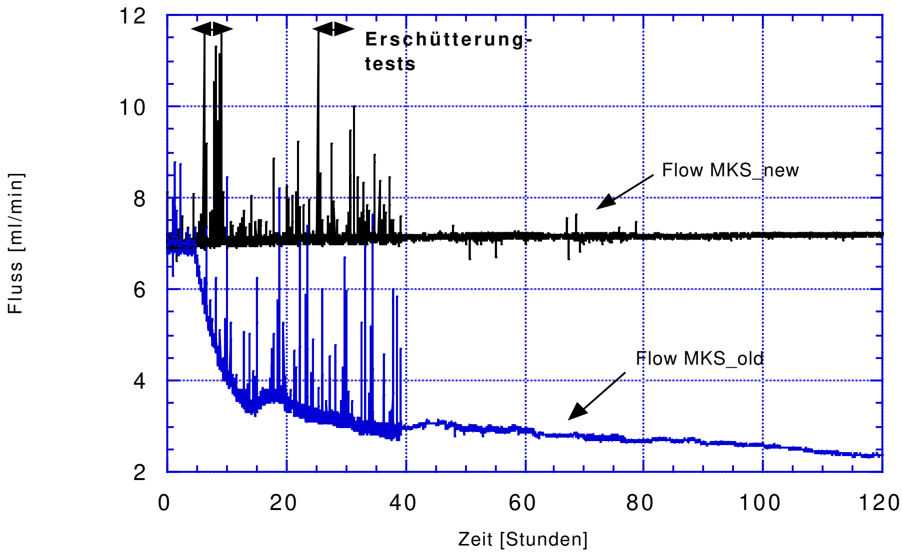

Abb. 3.5: Flußverlauf der getesteten beiden MKS-Massenflußregler

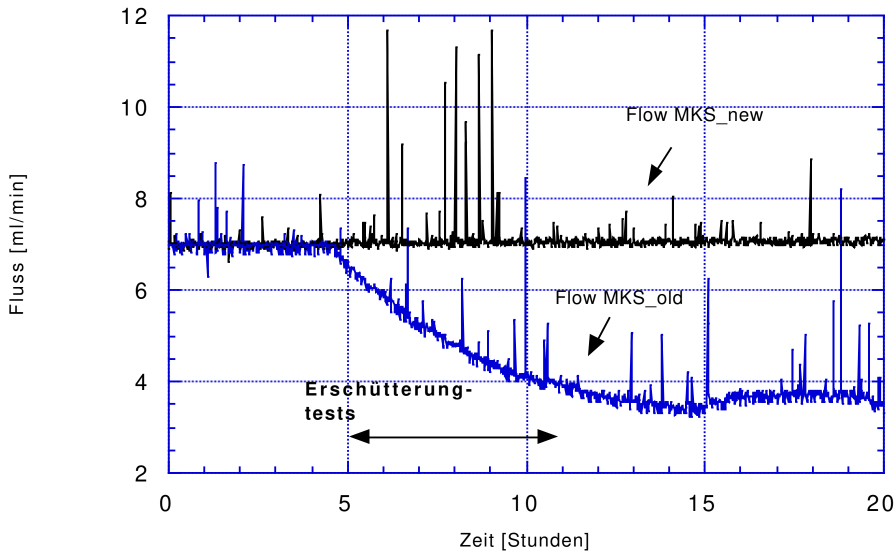

Abb. 3.6: Flußverlauf am Testbeginn (zeitlicher Ausschnitt aus Abbildung 3.5)

Ein 200 Gramm schwerer Quader (Grundfläche 10cm x 5cm) wurde aus einer Höhe von 10 cm auf die Tischplatte fallen gelassen, auf der sich die Massenflußregler befanden.

$$E_{pot} = m * g * h = 0,2 * 9,81 * 0,1J = 0,2J$$
$$A = 50cm^2 = 0,005m^2$$

Dabei wurde also eine Energie von 40 J/m^2 auf die Tischplatte übertragen.
In Abbildung 3.9 sind die Zeitbereiche der Erschütterungstests besonders gekennzeichnet.

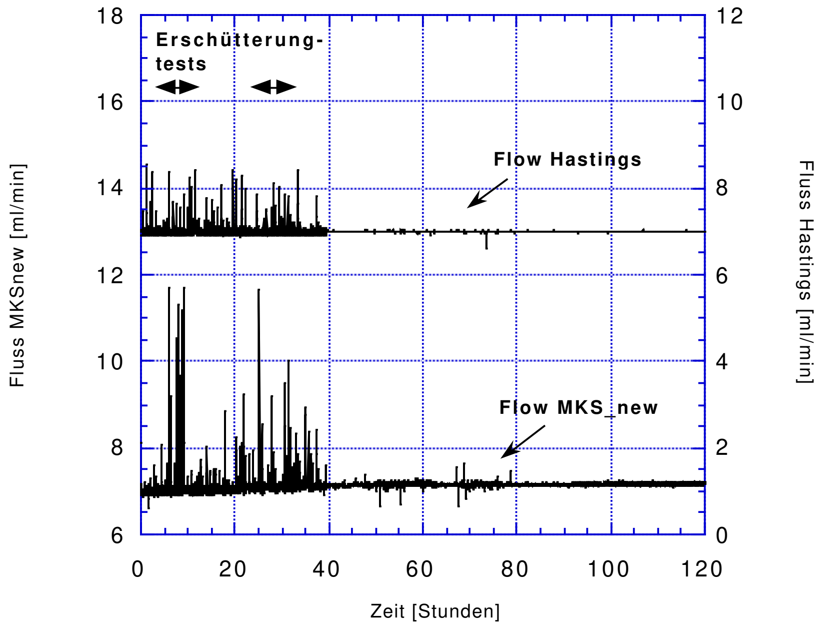

Abb. 3.7: Flußverlauf der beiden noch in Frage kommenden Massenflußregler

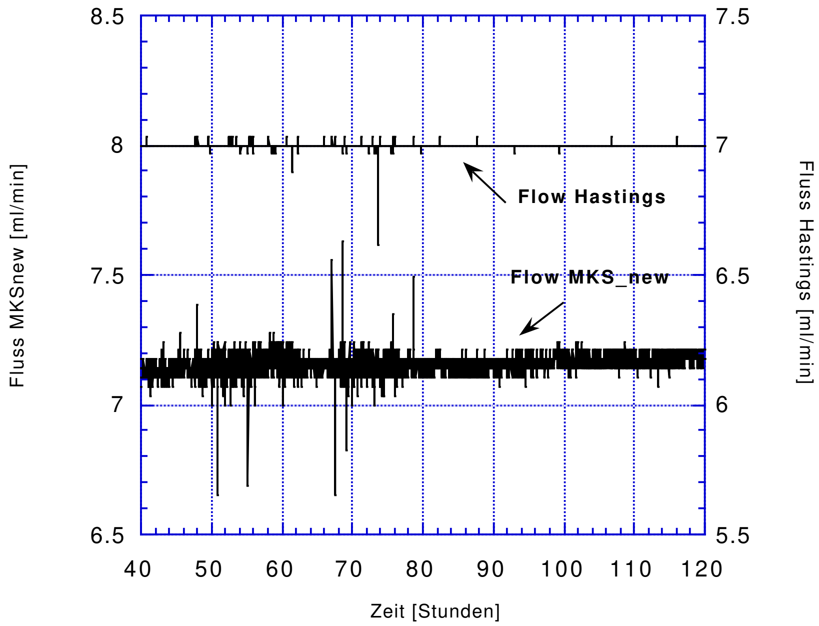

Abb. 3.8: Zeitlicher Ausschnitt des Flußverlaufes aus Abbildung 3.7 (Prüfung der Konstanz im Laufverhalten)

Hierbei zeigt sich, daß der MKS_new-Massenflußregler von den Erschütterungen deutlich stärker beeinflußt wird als der Hastings-Massenflußregler. Die Auswertung ergibt, daß der MKS_new auf die Erschütterungen mit einer kurzzeitigen etwa 60%igen Erhöhung des Flusses reagiert, während der Hastings auf dieselbe Erschütterung lediglich 15% Erhöhung des

Sollwertes aufweist. Die Reaktionen auf die Erschütterungen dauern jeweils etwa 10 sec an, ehe sich die Massenflußregler wieder auf ihren Sollwert eingestellt haben.

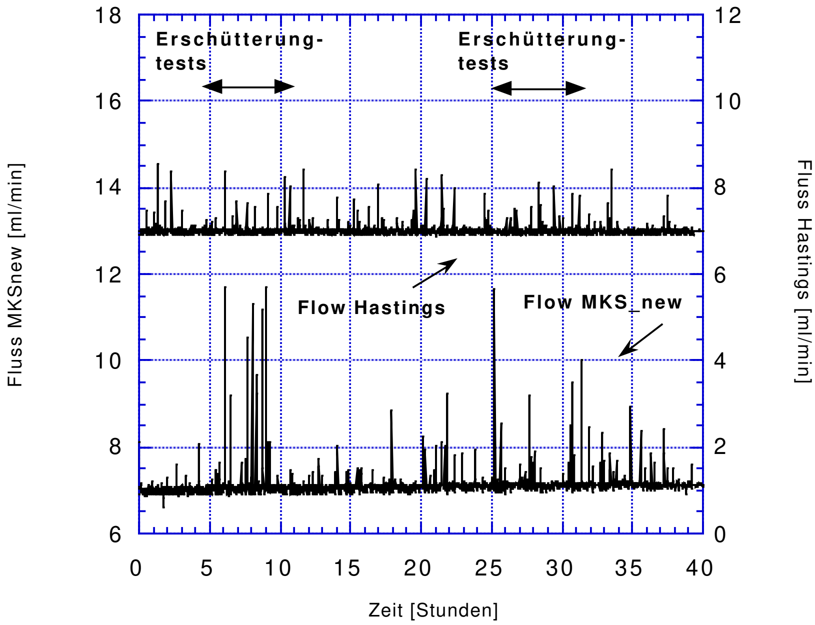

Abb. 3.9: Zeitlicher Ausschnitt des Flußverlaufes aus Abbildung 3.7 (Prüfung der Erschütterungsfestigkeit)

3.4.4 Interpretation der Meßergebnisse

Das schon früher beobachtete Verhalten des **MKS_old** -Massenflußreglers ist nur durch folgenden Mechanismus erklärbar.

Der MKS_old-Massenflußregler funktioniert so, daß durch Anlegen eines Stromes an eine integrierte Spule, ein - den Ventilkörper umschließender Magnet - bewegt wird und sich somit die Ventilstellung ändert.
Der den Durchfluß regulierende Ventilkopf des MKS_old- Massenflußreglers ist an der Unterseite durch eine Kalrez-Dichtung abgeschlossen. Quillt nun diese Dichtung beim Durchfluß des Dimethylether auf, muß der Massenflußregler das Ventil weiter öffnen, um trotzdem noch den geforderten Fluß zu erreichen. Die Ausdehnung der Dichtung führt nun mit der Zeit (den Meßergebnissen zufolge bereits nach ein paar Stunden) dazu, daß der Massenflußregler die gesamte Spannung aufwendet, um das Ventil anzuheben. Trotzdem tritt jetzt der Fall ein, daß die Durchflußmenge nicht mehr den richtigen Wert erreicht. Der Fluß fällt, und der Massenflußregler erhitzt sich aufgrund der dauerhaft anliegenden Maximalspannung. Diese Erhitzung führt zu einer Ausdehnung des Kolbens. Das Problem wird dadurch nochmals verschärft.

Daß dieser Effekt bei den anderen Geräten nicht auftritt, könnte folgenden Grund haben:

Eine andere Bauart könnte einerseits dazu führen, daß die beiden anderen Massenflußregler insgesamt einen größeren Hubbereich für das Regelventil zur Verfügung haben, so daß das Ausdehnen der Dichtung jederzeit noch korrigiert werden kann. Andererseits könnte eine geringere Erwärmung die Folge sein.

3.4.5 Schlußfolgerung

Aufgrund der Ergebnisse der beschriebenen Messungen fiel die Wahl auf den Massenflußregler der Firma Hastings (Abbildung 3.10). Dieser bewies sich resistenter gegenüber mechanischen Erschütterungen und zeigte insgesamt ein deutlich konstanteres Laufverhalten.

Die Entscheidung wurde durch zwei weitere Punkte gefestigt:

Erstens ist beim Hastings-Massenflußregler eine Wartung durch die günstigere Lage des Hauptventils viel schneller möglich als beim MKS-Produkt (ca. 5 Minuten im Vergleich zu etwa 1 Stunde), und zweitens ist der Hastings bei entsprechenden Stückzahlen geringfügig preisgünstiger als die getestete Konkurrenz.

Abb. 3.10: Der ausgewählte Hastings-Massenflußregler

Abb. 3.11: Die Setra-Druckdose des endgültigen Systems im Jahr 1999

3.5 Druckdosen

Die einzusetzenden Druckdosen messen den Druck in der Regelkammer. Dies geschieht aus Gründen der Redundanz durch zwei Druckdosen. Je eine weitere Druckdose mißt den Druck im Einlaß- und im Auslaßverteiler. Die Druckdosen befinden sich direkt im Experiment unter den Kammern. Der Meßwert einer Regelkammerdruckdose ist der Inputwert für den PID-Regler.

Zur Auswahl standen zwei Alternativen:

(1) SETRA-Druckwandler	Typ C267	(± 1mbar)	(**SETRA**)
(2) MKS-Baratron	Typ 223B	(± 1mbar)	(**MKS**)

Die Wahl der SETRA-Druckdosen [SETRA] für diesen Auswahltest war auf die Eignung laut Herstellerangaben, die Wahl der MKS-Druckdosen wiederum auf die langjährigen Erfahrungen mit Druckdosen dieser Firma im Physikalischen Institut, zurückzuführen.

3.5.1 Aufbau des Teststandes

Die beiden Druckdosen wurden im Parallelbetrieb über mehrere Tage - die Messung bezieht sich exemplarisch auf einen Zeitraum von 24 Stunden - unter den folgenden Bedingungen getestet:

Regeldruck: 340 μbar
Gas: Stickstoff

Zum Testen der Druckdosen wurde ein Testregelkreissytem aufgebaut. Hierbei wurde die SETRA-Druckdose als Regeldruckdose und das Gerät der Firma MKS als Referenz eingesetzt. Eine Vertauschung der Geräte hinsichtlich dieser Aufgabenverteilung beeinflußt das Resultat nicht.
Beide Druckmesser waren an ein kammerähnliches Volumen[3] angeschlossen. Der Testaufbau ist in Abbildung 3.12 dargestellt.

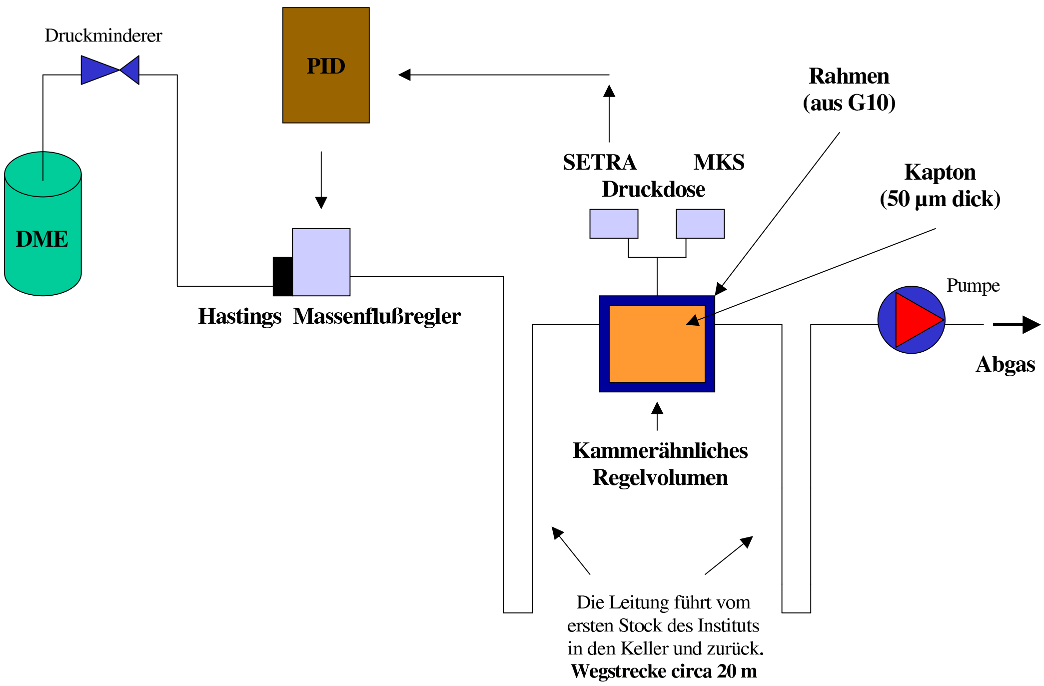

Abb. 3.12: Druckdosen-Testaufbau

[3]Das kammerähnliche Volumen hat eine Ausdehnung von $(10x10)cm^2$ Grundfläche bei einer Dicke von 3 mm. Es besteht aus einem 1 cm breiten Rahmen, der auf der Ober- und Unterseite mit einer dünnen Kapton-Folie beklebt ist, so daß sich das entstehende Volumen ausdehnen kann. Drei Kapillaren (Einlaß, Auslaß, Druckmessung) reichen in den Gasraum.

3.5.2 Messungen der Konstanz im Regelverhalten

In den Abbildungen 3.13 und 3.14 ist das Verhalten der beiden Druckdosen über die gesamte Meßdauer hinweg dargestellt.
Durch die Wahl gleicher Druckachsen erkennt man sofort, daß die SETRA-Druckdose wesentlich geringere Schwankungen zeigt. Bei der SETRA-Druckdose liegen die Schwankungen in der Größenordnung ± 15 μbar, während die MKS-Dose gelegentliche Ausbrüche um mehrere hundert μbar zeigt (*"Spikes ohne Magnetfeld"*).
Ein Vergleich der Abbildungen 3.15 und 3.16 zeigt das angesprochene Verhalten in einem zeitlichen Ausschnitt.
Vernachlässigt man die großen, sehr kurzfristigen Ausbrüche im Druckverlauf der MKS-Druckdose, erkennt man, daß diese Druckdose an sich geringere Schwankungen zeigt (kleiner ± 10 μbar) als die SETRA-Dose (siehe Abbildung 3.17 und 3.18).

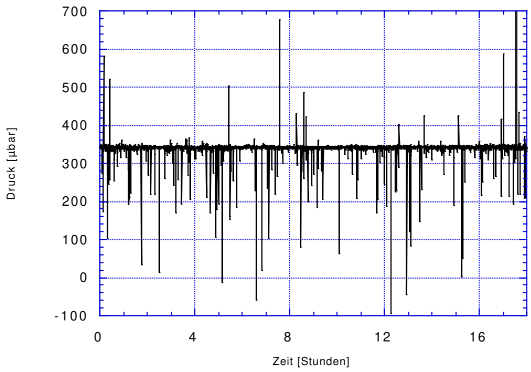

Abb. 3.13: Regelverhalten einer **MKS**-Druckdose

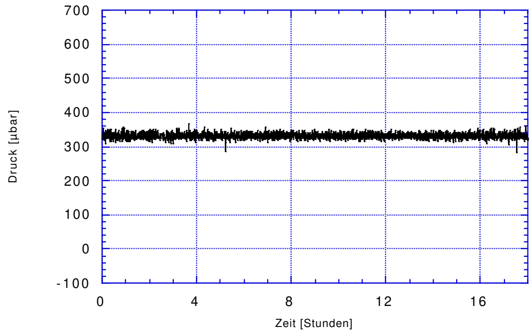

Abb. 3.14: Regelverhalten einer **SETRA**-Druckdose

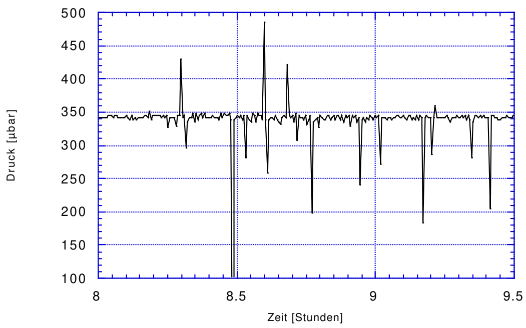

Abb. 3.15: Zeitlicher Ausschnitt des Regelverhaltens einer **MKS**-Druckdose

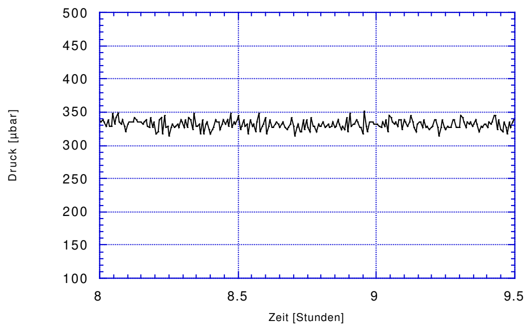

Abb. 3.16: Zeitlicher Ausschnitt des Regelverhaltens einer **SETRA**-Druckdose

3.5.3 Messungen der Erschütterungsfestigkeit

Auf mechanische Erschütterungen, die durch den - im Kapitel 3.4.3 geschilderten Mechanismus hervorgerufen wurden - konnte keine Reaktion der beiden Druckdosen festgestellt werden.

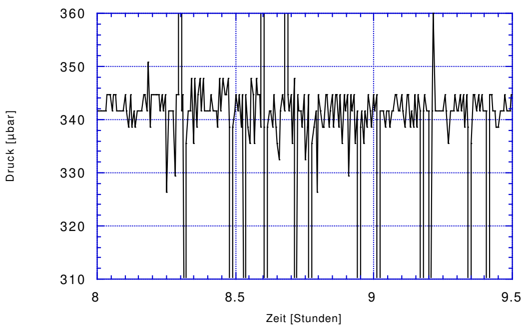

Abb. 3.17: Zeitlicher Ausschnitt des Regelverhaltens einer **MKS**-Druckdose (geänderter Maßstab der Druckachse im Vergleich zu Abbildung 3.15)

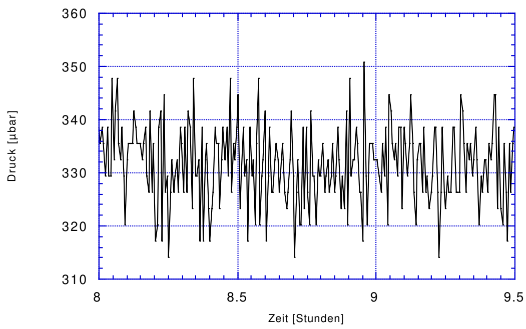

Abb. 3.18: Zeitlicher Ausschnitt des Regelverhaltens einer **SETRA**-Druckdose (geänderter Maßstab der Druckachse im Vergleich zu Abbildung 3.16)

3.5.4 Messungen des Verhaltens im Magnetfeld

Die in den Abbildungen 3.19 und 3.20 bzw. 3.21 gezeigten Meßergebnisse zeigen das Verhalten der Druckdosen in einem etwa 0,8 Tesla großen Magnetfeld. Dieses ist die maximale Feldstärke, denen die Druckdosen im Experiment ausgesetzt werden. Die dargestellten Ergebnisse zeigen exemplarisch lediglich einen Zeitausschnitt der durchgeführten Messungen.
Während die SETRA-Druckdose im Magnetfeld keinerlei Veränderung aufzeigt, erhöht sich die Zahl der beschriebenen Ausbrüche der MKS-Dose im Magnetfeld auf ein Vielfaches (*"Spikes mit Magnetfeld"*). Auffällig ist hierbei, daß es sich im Magnetfeld nur noch um Einbrüche in der Druckkurve handelt, daß es also keinerlei Schwankungen mehr nach oben gibt.

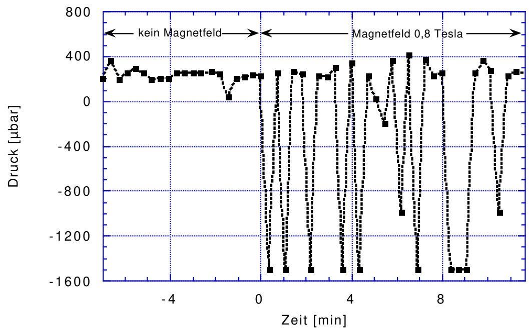

Abb. 3.19: Verhalten einer **MKS**-Druckdose im Magnetfeld

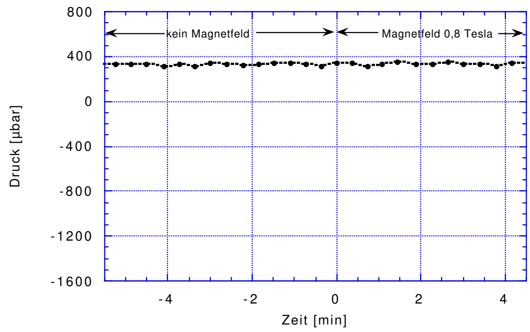

Abb. 3.20: Verhalten einer **SETRA**-Druckdose im Magnetfeld

3.5.5 Messungen des Verhaltens auf Temperaturschwankungen

Die Untersuchungen bezüglich des Verhaltens der Druckdosen auf Temperaturschwankungen ist in der Abbildung 3.22 dargestellt.

Die Temperaturschwankungen wurden mit einem Heißluftfön erzeugt, wobei darauf geachtet wurde, möglichst keinerlei Luftverwirbelungen am Referenzeingang der Druckdosen zu erzeugen, da dadurch die Meßergebnisse verfälscht worden wären. Durch den Fön wurde

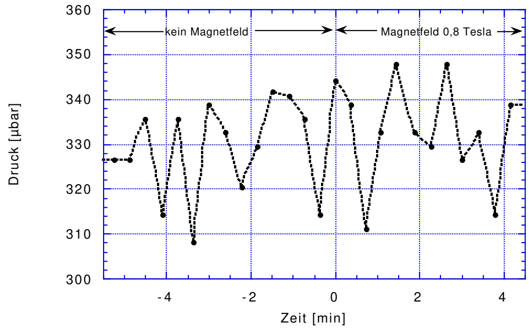

Abb. 3.21: Verhalten einer **SETRA**-Druckdose im Magnetfeld (geänderter Maßstab der Druckachse im Vergleich zu Abbildung 3.20)

eine Temperatur von etwa 60^0C erzeugt. Im Experimenteinsatz werden lediglich Temperaturen im Bereich von 10^0C bis 40^0C erwartet. Nacheinander wurde nun zuerst die aufgeschraubte SETRA-Dose, dann die geschlossene MKS-Druckdose und schließlich noch einmal die SETRA-Druckdose, jetzt allerdings ebenfalls geschlossen, der Hitzeeinwirkung ausgesetzt.

Man erkennt, daß keines der beiden Geräte erkennbar auf die Temperaturschwankungen reagiert. Allenfalls bei der MKS-Druckdose sieht man geringe Veränderungen, die man allerdings nicht als signifikant einordnen kann.

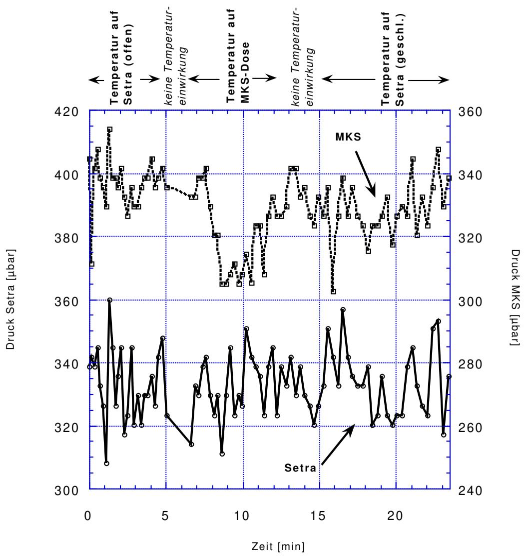

Abb. 3.22: Verhalten einer **MKS**- und einer **SETRA**-Druckdose auf Temperaturschwankungen

3.5.6 Interpretation der Meßergebnisse

Die “Spikes ohne Magnetfeld” der MKS-Druckdose können folgende Gründe haben:

- Sie können elektronisch verursacht sein.
- Es können reale, sehr kurzfristige Druckschwankungen sein, die nur diese Druckdose überhaupt registriert.

Handelt es sich um elektronisch bedingte Schwankungen, ist der Einsatz dieser Druckdose nicht möglich. Reale, sehr kurzfristige Druckschwankungen sollten aufgrund der speziellen Erfordernisse von den Druckdosen nicht registriert werden, sondern intern herausgemittelt werden.

Die “Spikes im Magnetfeld” dagegen sind vermutlich auf - in der MKS-Druckdose enthaltene - ferromagnetische Teile zurückzuführen. Reale Druckschwankungen dieser Größenordnung (mehrere hundert μbar) und Häufigkeit sind hier sehr unwahrscheinlich. Außerdem werden nur Einbrüche im Druckverlauf festgestellt.

3.5.7 Schlußfolgerung

Aufgrund der Ergebnisse der Konstanzüberprüfung und vor allem der Magnetfeldtests fiel die Wahl auf die Druckdose der Firma SETRA (Abbildung 3.11). Die nicht endgültig geklärten drastischen Schwankungen im Druckverlauf, die nicht wirklich etwas mit realen Druckschwankungen zu tun haben können, lassen das Produkt der Firma MKS nicht in Betracht kommen. Die MKS-Druckdose ist im Hera-B Magnetfeld nicht einsetzbar.

Gegen die SETRA-Druckdose spricht, daß sie ohne einen vom Institut durchzuführenden Umbau nicht mit DME verträglich ist, da sie am Meßeingang Materialien enthält (Buna-Schlauch), die von DME angegriffen werden. Das Konkurrenzprodukt hingegen hat eine ausgezeichnete Verträglichkeit mit DME auch ohne Umbau. Dies ist auch der Grund, weshalb der vorliegende Test mit Stickstoff und nicht mit Dimethyether durchgeführt wurde.
Inzwischen wurde gezeigt, daß der erforderliche Umbau der Setra-Druckdosen (der Schlauch am Meßeingang wird durch ein Peek-Stück ersetzt) in einem vertretbaren Zeitrahmen möglich ist und daß dadurch keinerlei negative Veränderungen der Druckdose auftreten.

Für den Prototypaufbau kamen allerdings die MKS-Druckdosen zum Einsatz, da der angesprochene Umbau der SETRA-Dosen auf DME-Tauglichkeit noch nicht durchgeführt worden war. Dies war möglich, da das Magnetfeld am Ort der Kammerstation, die im Jahr 1998 installiert wurde, nicht den Maximalwert erreicht.

3.5.8 Langzeitregelung eines kammerähnlichen Volumens

Mit der - aus den Tests ausgewählten - Hardware wurde nun eine Regelung über 14 Tage hinweg betrieben. Die Unterschiede im Aufbau verglichen mit den Druckdosentests können der Abbildung 3.23 entnommen werden.
Wiederum wurde Stickstoff genutzt, um auch die SETRA-Druckdose einsetzen zu können.
Der Kammerdruck wurde mit der SETRA-Druckdose, die somit auch als Regeldruckdose genutzt wurde, gemessen. Die MKS-Druckdose diente der Messung des Leitungsdruckes vor der Kammer. Für die beiden angesprochenen Messungen des Druckes auf SETRA-Druckdosen zurückzugreifen war nicht möglich, da zu dieser Zeit nur ein Testexemplar der Firma SETRA zur Verfügung stand.

Die aufgenommenen Meßkurven zeigen exemplarisch 2,5 Tage des gesamten Meßzeitraumes.

Aufbau des Teststandes

Der Langzeittest wurde unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

Regeldruck:	330 μbar
Vordruck:	0,2 bar
Hinterdruck:	0 bar
Gas:	Stickstoff

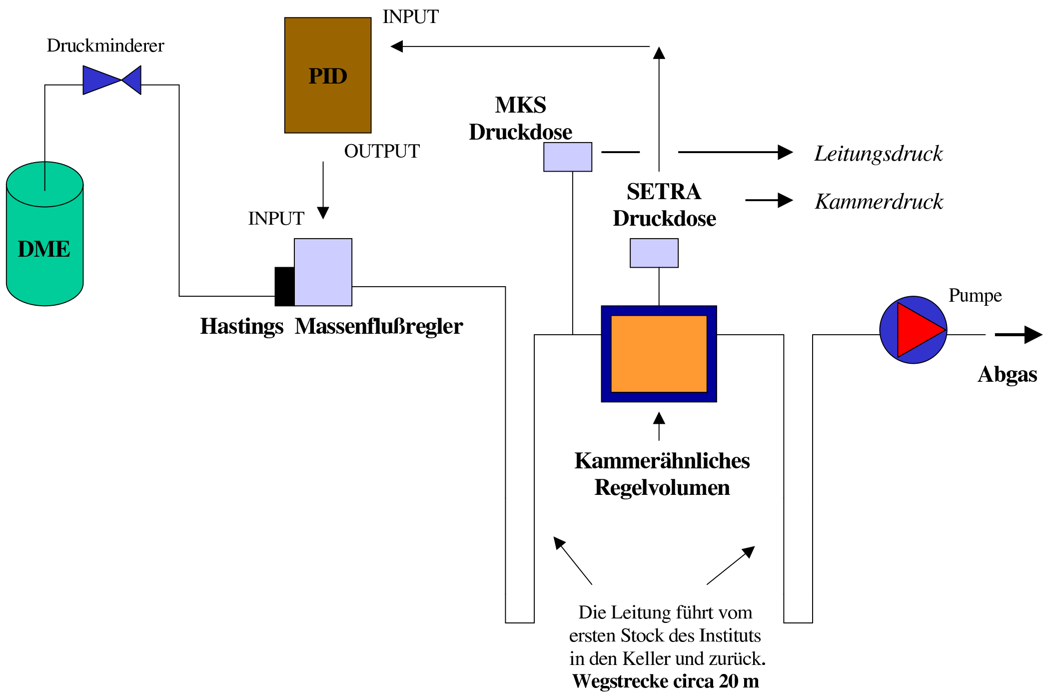

Abb. 3.23: Testaufbau zur Regelung eines kammerähnlichen Volumens

Messungen

Die Abbildung 3.24 zeigt den Verlauf von Kammer- und Leitungsdruck und den dazugehörigen Fluß durch den Massenflußregler. Ein zeitlicher Ausschnitt ist in Abbildung 3.25 dargestellt.

Man erkennt im Verlauf der Kammerdruckkurve wesentlich geringere Schwankungen als beim Leitungsdruck. In Abbildung 3.26 wird dies noch deutlicher.

Die genauen Schwankungen von Kammerdruck, Leitungsdruck und Fluß erkennt man in den Abbildungen 3.27, 3.28 und 3.29.

Die Schwankungen des Kammerdrucks liegen bei $\pm$ 10 μbar, die des Druckes in der Leitung bei $\pm$ 20 μbar, wobei hier wiederum die schon oben festgestellten Ausbrüche um bis zu einigen hundert μbar festzustellen sind (Messung des Leitungsdruckes mit der MKS-Druckdose).

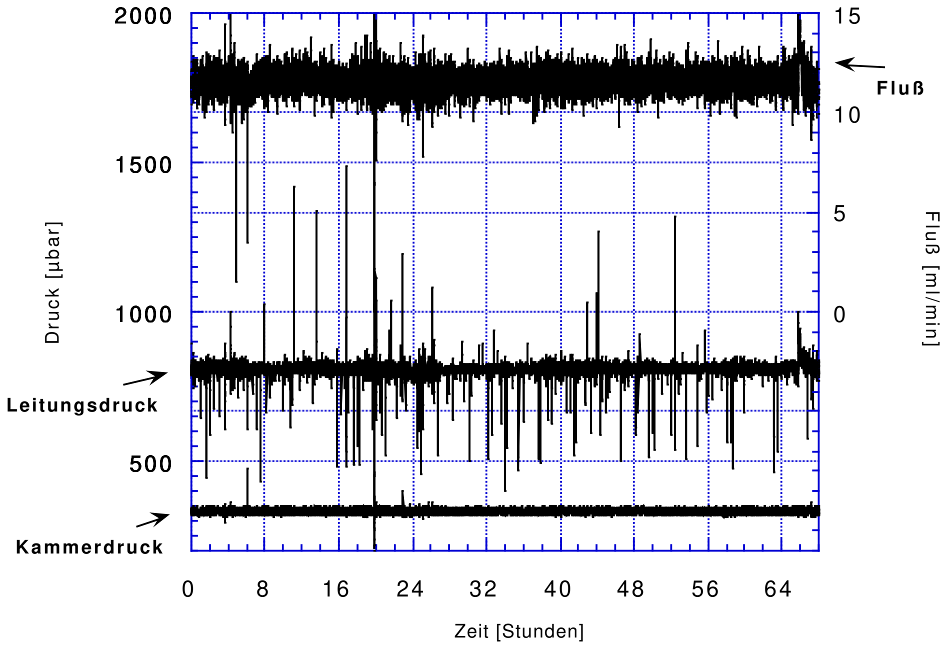

Abb. 3.24: **Leitungsdruck**, **Kammerdruck** und **Fluß** in zeitlicher Abhängigkeit

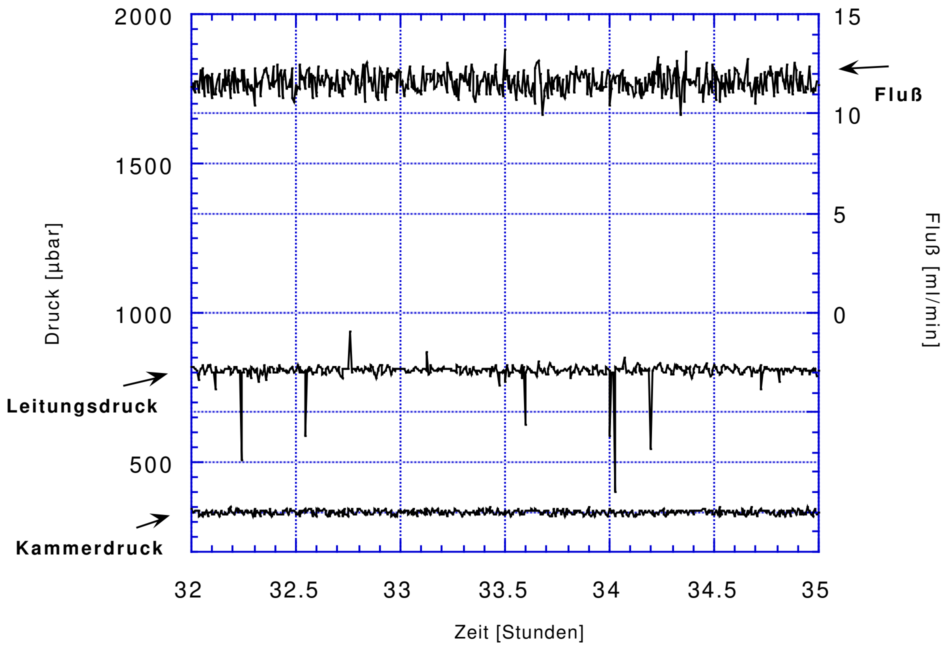

Abb. 3.25: Zeitlicher Ausschnitt der Abbildung 3.24

Abbildung 3.30, in der ein halbstündiger Ausschnitt des Kammerdruck- bzw. Flußverlaufes dargestellt wird, zeigt keine sichtbare Korrelation zwischen dem Kammerdruck und dem Fluß.

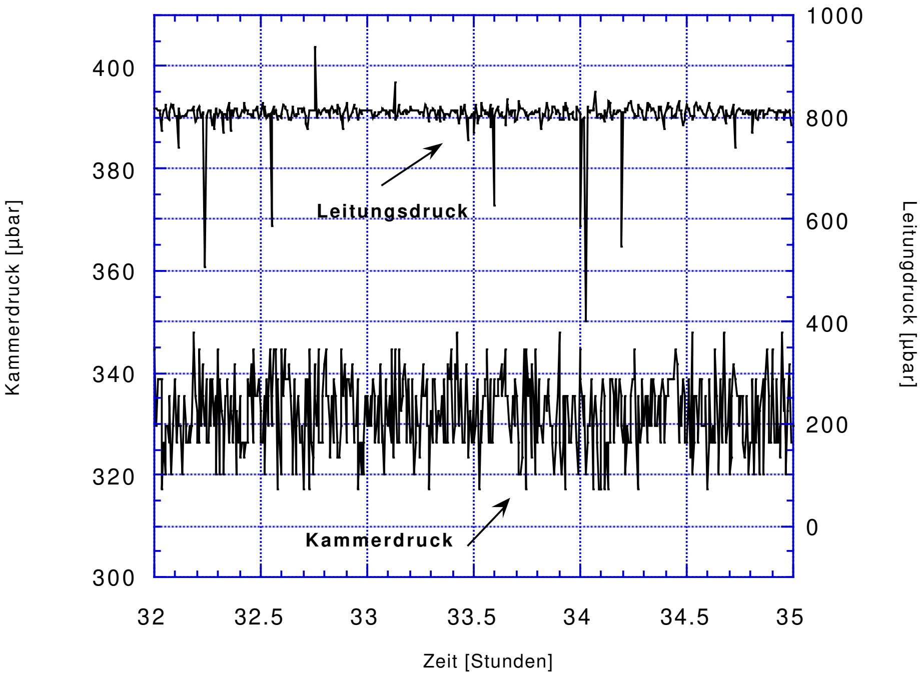

Abb. 3.26: Zeitlicher Ausschnitt des **Druckverlaufes** in der **Leitung** und in der **Kammer**

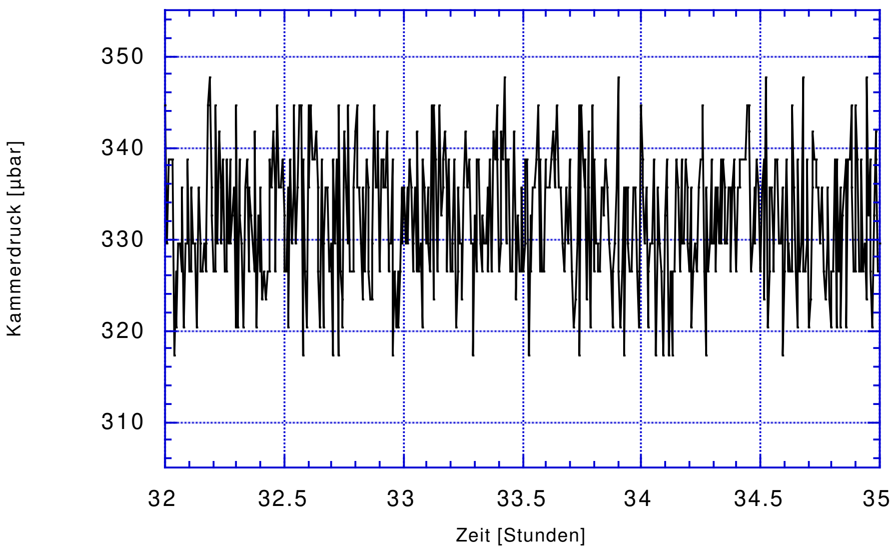

Abb. 3.27: Zeitlicher Ausschnitt des **Kammerdruckverlaufes**

Interpretation der Meßergebnisse

Die geringeren Schwankungen des Kammerdrucks im Vergleich zum Leitungsdruck erklären sich vor allem daraus, daß das kammerähnliche Volumen kurzzeitige Druckschwankungen wegpuffert, da es sich ausdehnen kann. Zum anderen ist zu beachten, daß für die Messung des Druckes in der Kammer die schwankungsärmere SETRA-Dose benutzt wurde. Die Ausbrüche im Verlauf des Leitungsdruckes sind auf den Einsatz der MKS-Druckdose zurückzuführen.

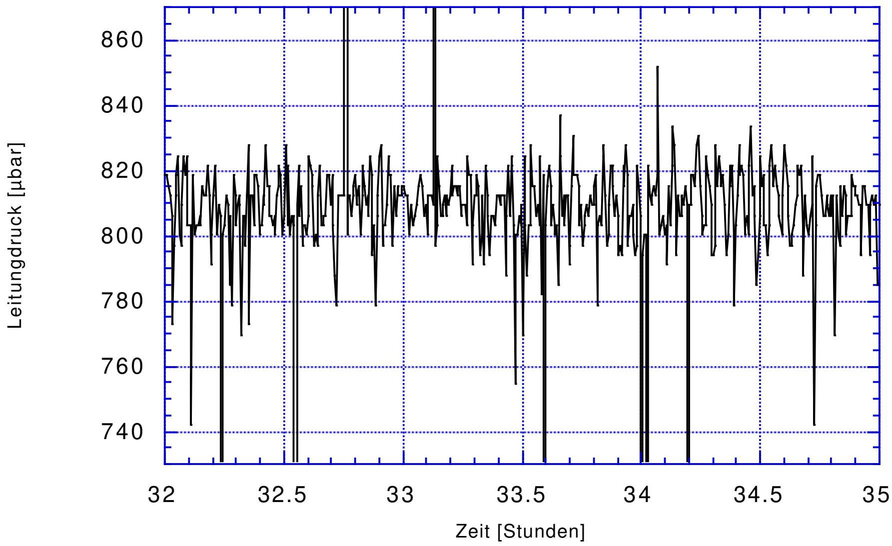

Abb. 3.28: Zeitlicher Ausschnitt des **Leitungsdruckverlaufes**

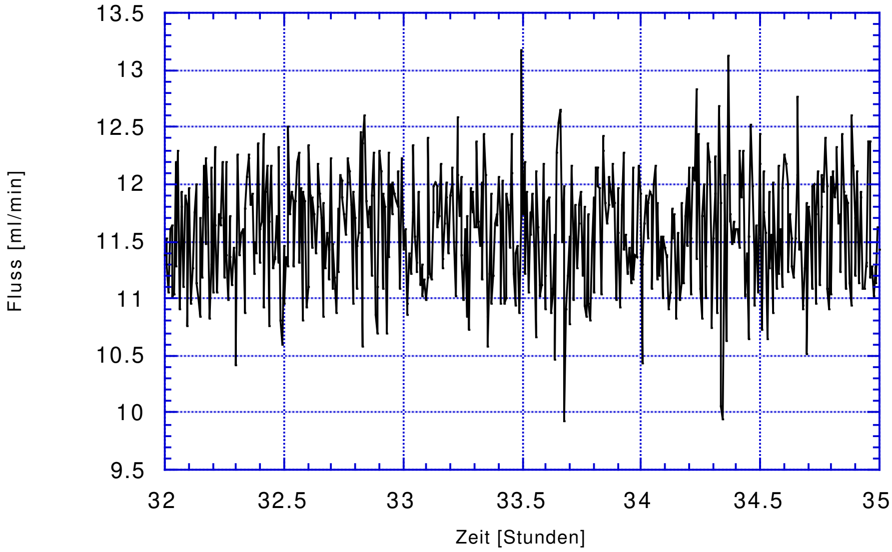

Abb. 3.29: Zeitlicher Ausschnitt des **Flußverlaufes**

Daß zwischen dem Kammerdruck und dem Flußverlauf keine Korrelation deutlich wird, erklärt sich durch die Eigenschaften des PID-Reglers[4] (siehe Kapitel 2.2).

Ergebnis

Der Langzeittest macht deutlich, daß die ausgewählte Hardware (Massenflußregler, Druckdose und PID-Regler) ihre Aufgabe optimal erfüllen kann.

[4]Eine Korrelation würde sich vor allem in Form einer Schwingung zeigen und genau dies wird durch den PID-Mechanismus verhindert.

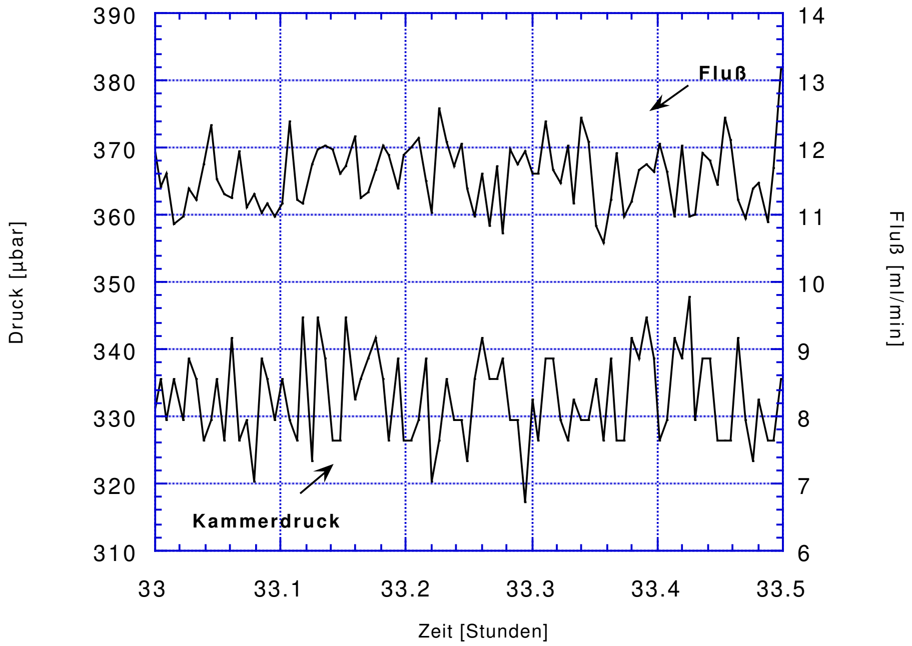

Abb. 3.30: Untersuchung einer möglichen Korrelation zwischen dem **Kammerdruck** und dem **Fluß**

3.6 Drucksensoren

Die Drucksensoren dienen an verschiedenen Stellen des Gassystems der zusätzlichen Kontrolle des herrschenden Druckes. Sie liefern ein Analogsignal an die SPS. Dabei kommt es nicht im selben Maße auf die Genauigkeit der Messung an, wie bei der Messung der Kammerdrücke durch die Druckdosen. Die Genauigkeit der Verwendung findenden Kobold-Sensoren liegt im Bereich von 0,5% - 1%.

Im Prototypgassystem 1998 und in der Gasmischanlage kommen Kobold-Drucksensoren (Abbildung 3.31) [IMT] zum Einsatz.

Für die endgültigen Regelsysteme 1999 erwies es sich später als ökonomischer einen anderen Typ der Kobold-Drucksensoren auszuwählen. Mit diesen Sensoren ist es möglich, relativen Über- bzw. Unterdruck mit einem einzigen Gerät zu messen (zu diesem Zweck wären zwei Kobald-Drucksensoren des alten Typs erforderlich). Dies führt dazu, daß pro Meßstelle nur ein analoger Eingang der SPS genutzt wird.

3.7 Druckschalter

Die Druckschalter sind rein sicherheitstechnische Zusatzvorkehrungen mit einer relativ großen Meßungenauigkeit von etwa 20 %. Sie dienen der Notabschaltung bei Betriebszuständen, die deutlich gegen kritische Werte tendieren. Im Normalfall liefern die Schalter ein 24 Volt Signal an die SPS, das im Störungsfall nicht mehr durchgeschaltet wird, worauf die Steuerung einen Alarm auslöst und das System in einen sicheren Zustand bringt.

Druckschalter von Kobold (Abbildung 3.32) [KOBOLD] besitzen eine für den Einsatzzweck völlig ausreichende Genauigkeit. Die mit dem durchströmenden Gas in Verbindung kommenden Komponenten sind sämtlich aus Edelstahl.

Abb. 3.31: Kobold Drucksensor

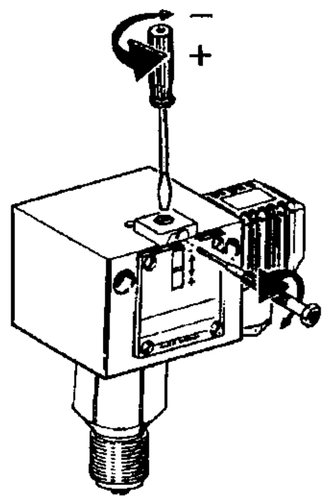

Abb. 3.32: Kobold Druckschalter

3.8 Pneumatikventile

Die Ventile stellen die zentralen Sicherheitskomponenten dar, denn sie können im Trailer die Gaszuflußleitung und die Leitung, die zur Pumpe führt, schließen. Zwei weitere Ventile entlüften die Kammern im Alarmfall, sie befinden sich direkt unter den Kammern im Experiment.

Die ausgewählten Ventile sind Faltenbalgventile, denn nur diese gibt es im Preisbereich bis 500 DM ohne Teflondichtungen oder mit Silikonöl geschmierten Dichtsimmeringen. Beides wäre unvereinbar mit den allgemeinen Anforderungen an die Komponenten des Gassystems.

Die Faltenbalgventile müssen den folgenden Kriterien genügen:

1. möglichst große Dichtheit

2. hervorragende Qualität der enthaltenen Federn
   Dieses Federn müssen auch noch nach vielen Jahren und einer immensen Zahl an Schaltvorgängen einwandfrei funktionieren. Der gesamte Mechanismus muß deshalb hohen Qualitätsansprüchen genügen.

3. Schaltung durch Druckluft
   Diese Forderung nach Pneumatikventilen ergibt sich aus folgenden Tatsachen:

   - Die Ventile müssen im Hera-B Magneten funktionieren (0,8 Tesla).
     Magnetventile scheiden aus diesem Grund sofort als Alternative aus.

- Es können aus Sicherheitsgründen nur explosionsgeschützte Ventile eingesetzt werden.
  Explosionsgeschützt heißt dabei, daß entweder kein Gas in den fraglichen Bereich eindringen kann oder daß kein Funke entstehen kann.
- Preislich ergibt sich kein Unterschied zu anderen Schaltungsweisen. Lediglich explosionsgeschützte Magnetventile sind etwa doppelt so teuer.
- Die erhältlichen Magnetventile besitzen alle konische Gewinde im Ventilkörper. Um den Übergang auf A-lok-Rohranschlüsse sicherzustellen, muß ein NPT[5] Adapter eingesetzt werden. Die Dichtung dieses Gewindes ist nur durch Klebung (Bruchgefahr) oder durch Nutzung von Telfonband (Ausgasen in Verbindung mit DME) möglich. Magnetventile sind auch aus diesem Grund nicht einsetzbar.

Die Entscheidung fiel auf Pneumatikventile der Firma Parker (Schnittbild in Abbildung 3.33) [PARKER 1], denn diese erfüllen alle beschriebenen Forderungen[6], und gleichwertige andere Produkte sind etwa 7% teurer.

Die zum Schalten der Pneumatikventile benötigte Preßluft wird dabei nur bis zu einem Verteiler in das Gasrack auf dem Trailer geleitet. Die SPS ist dann in der Lage, die Ventile einzeln zu schalten, indem sie ein 24 Volt Signal an einen Verteiler (Produkt der Firma Crouzet) sendet. Erhält der Verteiler das Spannungssignal, wird die Preßluft an das entsprechende Ventil durchgeschaltet, das dann seinen Zustand (geschlossen / offen) wechselt.

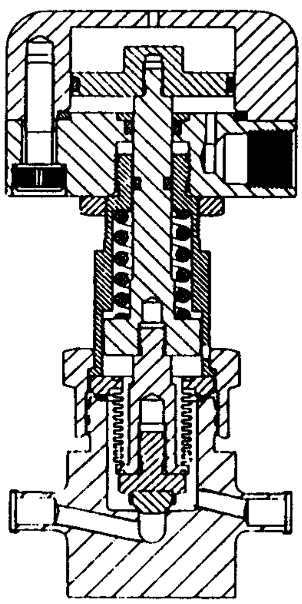

Abb. 3.33: Schnitt durch ein Pneumatikventil der Firma Parker

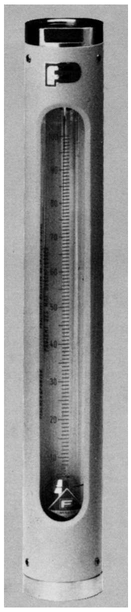

Abb. 3.34: Der ausgewählte Schwebekörperflußmesser

[5]NPT = National Pipe Taper (konisches Gewinde)

[6]Das Standardgerät enthält zwar im Faltenbalg eine Teflonbeschichtung, es ist aber alternativ mit einer Nickelbeschichtung erhältlich.

3.9 Schwebekörperflußmesser

Schwebekörperflußmesser werden im Trailer installiert. Sie dienen der optischen Überwachung des Gasflusses im Zu- und Rücklauf.

Eine Marktrecherche zeigte, daß erstens die meisten gängigen Geräte viele Dichtringe aus Teflon oder Viton enthalten (typisch sechs O-Ringe pro Flußmesser). Zweitens beinhaltet der Schwebekörperflußmesser bei den meisten Anbietern ein Nadelventil mit einem mit Öl geschmierten Simmering.

Es bestand hier also die Aufgabe, einen Flußmesser ohne Nadelventil und mit möglichst wenigen Dichtringen zu finden. Je nach Anzahl erhöht der erforderliche Umbau aller enthaltenen O-Ringe auf Kalrez den Einzelstückpreis erheblich. Bei der großen Anzahl von Schwebekörperflußmesser im System für 1999 ist die Anzahl der Ringe also eine Preisfrage und zusätzlich eine Frage des Arbeitsaufwandes.

Die Wahl fiel deshalb auf einen Schwebekörperflußmesser der Firma Fischer & Porter (Abbildung 3.34), denn diese erfüllen alle beschriebenen Forderungen und enthalten nur zwei O-Ringe, die von der Firma auf Kalrez umgerüstet werden.

3.10 Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)

Die SPS dient der Aufnahme und Kontrolle aller Meßwerte des Systems. Sie steuert das Anfahren des Systems und sorgt im Alarmfall für einen sicheren Zustand des Systems.

Aus einer Vielzahl von möglichen Anbietern speicherprogrammierbarer Steuerungen (SPS), so zum Beispiel die Firmen *Klöckner-Moeller*, *ABB* und *Siemens* wurde nach folgenden Kriterien ein geeigneter Kandidat ausgesucht:

1. **Zuverlässigkeit**: Dieses Kriterium fragt nach schon bestehenden Erfolgen des Produktes auf dem Markt. Wichtig ist ebenfalls, wie lange es dieses Produkt schon auf dem Markt gibt.

2. **Kompatibilität mit der Peripherie**: Hierbei kommt es vor allem darauf an, daß die SPS einen MODBus-Interface besitzt für den Anschluß des PID.

Das Kriterium der Kompatibilität ließ zum Zeitpunkt der Kaufentscheidung die Klöckner-Moeller SPS als Alternative ausscheiden.
Die ABB SPS war zum einen erheblich teurer als die anderer Anbieter, und außerdem gab es keinerlei Erfahrungen mit Steuerungstechnik dieser Firma.

Die Entscheidung fiel auf die SPS der Firma Siemens (Abbildung 3.35), da die S7 damals seit etwa zwei Jahren auf dem Markt war. Somit konnte davon ausgegangen werden, daß **Anfangsprobleme mit Hard- oder Software schon gelöst** wurden. Da bei der S7 ein **modbusfähiger Kommunikationsprozessor** als Erweiterungsbaugruppe angeboten wird, war dieses wichtige Kriterium erfüllt. Ein weiterer Grund waren **positive Erfahrungen**, die Mitarbeiter des Instituts mit der Siemens S5, dem Vorgängermodell, gesammelt hatten. Schließlich bot die Firma Siemens einen, neben den ohnehin schon relativ niedrigen Preisen, außergewöhnlichen Hochschulrabatt, 50% auf Software und 30% auf Hardware.

Aus der Wahl dieses Produktes resultiert die Notwendigkeit auf den Computern, die das Gassystem steuern, WindowsNT oder Windows95 zu installieren, da die zugehörige SPS-Software nur unter diesen Betriebssystemen lauffähig ist. Aufgrund des stabiler laufenden Betriebssystems fiel die Entscheidung auf WindowsNT.

Die wichtigsten in der Abbildung 3.35 gezeigten Bauteile der ausgewählten SPS sind:

(1)	Stromversorgungsbaugruppe	
(2)	Pufferbatterien	(Rettung von remanenten Merkern)
(3)	Betriebsartenschalter	(Run/Stop)
(4)	LEDs zur Status- und Fehleranzeige	
(5)	Memory Card	(Speicherung der Programme)
(7)	CPU	
(11)	Ein-/Ausgabebaugruppen	(analoge und digitale Ein- und Ausgänge)
(12)	Anschaltungsbaugruppe	(Kommunikation mit weiteren Baugruppenträgern)

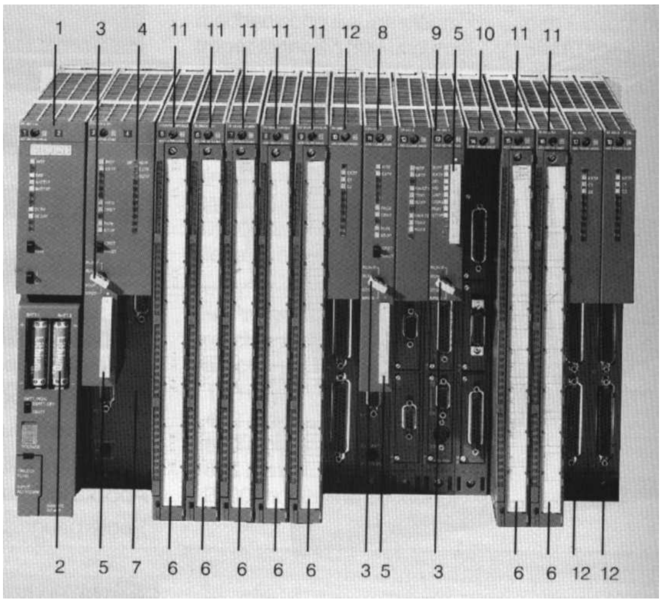

Abb. 3.35: S7-400

3.11 Spannungsversorgung der Massenflußregler und Druckdosen

Für die Spannungsversorgung der Druckdosen (±12 Volt) im Prototypsystem und für die Massenflußregler allgemein (±15 Volt) wird ein Gerät benötigt.

Die Wahl fiel auf den DC/DC-Converter der Firma VERO, denn das ausgewählte Gerät macht es möglich, schon im System vorhandene Spannungen (24 VDC) als Eingangsspannung zu nutzen. Außerdem liefert eine Baugruppe dieses Herstellers sowohl die positive als auch die negative eingestellte Spannung. Dies erfordert insgesamt weniger Komponenten.

3.12 Wellschläuche

Wellschläuche stellen die Verbindung vom Trailer zu den Kammern und zurück her.

Problematisch bei den Wellschläuchen sind zwei Punkte, die wiederum die Reinheit betreffen:

Man benötigt zur Herstellung der Schläuche Gleitmittel, die bei vielen Herstellern teflon- und/oder ölhaltig sind. Schläuche, die mit dieser Art Gleitmittel hergestellt sind, können im Gassystem aus den in Kapitel 3.1.2 angesprochenen Gründen nicht verwendet werden. Außerdem benötigt man ein vernünftiges Verfahren, die Schläuche nach der Herstellung zu reinigen und auf Dichtigkeit zu testen. Dieser zweite Punkt stellt vor allem aufgrund der Schlauchlängen (55 m) keine Trivialität dar, denn es sind große Drücke zum Spülen mit Wasser erforderlich, und man muß eine starke Temperaturabkühlung über die Länge des Schlauches vermeiden, um eine gleichbleibende Reinheit über die gesamte Schlauchlänge zu erreichen.

Die Wellschläuche der Firma Paul Martin, ein Unternehmen der Witzenmann-Gruppe, konnten die genannten Ansprüche erfüllen.

Begründung:

1. Es handelt sich bei den Schläuchen um Ringwellschläuche, die ohne Verwendung von kohlenwasserstoff- bzw. siliconhaltigen Schmiermitteln hergestellt sind.

2. Die Rohrenden sind mit Schutzgas grat- und spaltfrei verschweißt.

3. Reinigungs- und Testverfahren: Die Dichtheit wird hierbei mit Stickstoff unter Wasser geprüft. Dies entspricht einem Heliumlecktest unter 10^{-4} mbar l/s. Anschließend findet eine Kreislaufspülung mit Wasser statt. Es folgt eine Außen- und Innentrocknung im Trockenschrank bei mind. 100 ^{0}C. Auch während der Abkühlphase wird das Innere mit getrockneter Druckluft getrocknet. Der Taupunkt liegt anschließend bei max -10 ^{0}C, was einen Rückschluß auf die zurückgebliebene Wassermenge zuläßt (entspricht etwa 1000 ppm in der Gasphase). Eine Endkontrolle wird mit einem Endoskop durchgeführt.

Da eine weitere Reinigung durch das Spülen mit Dimethylether im Institut durchgeführt wird, die sich über einen Zeitraum von etwa einem Vierteljahr erstreckt, stellen die dann vorhandenen Schläuche eine Lösung dar, die den Ansprüchen genügt.

Hervorzuheben ist auch die große Kooperation der Firma, die das Reinigungsverfahren extra für die Ansprüche des ITR geändert und zugeschnitten hat.

Aus der vom Hersteller angegebenen Dichtigkeit[7] von 10^{-4} mbar l/s errechnet sich eine maximale Leckrate pro Schlauch (Länge 55 m) von etwa 9 ml/Tag.

[7]Dieser Wert stellt eine Obergrenze dar, die im Normalfall weit unterschritten wird.

3.13 Edelstahlrohre

Edelstahlrohre werden für alle Gasverbindungen genutzt mit Ausnahme der Verbindung vom Trailer zu den Kammern und zurück.

Die Wahl des Lieferanten für die benötigten Edelstahlrohre fiel auf die Firma Dockweiler.

Begründung:

Die zu bestellenden Rohre müssen einem genau definierten Qualitätsstandard, vor allem bezüglich der Reinheit, entsprechen. Die Firma Dockweiler hatte bereits das Rohrmaterial für die gesamte Gasversorgungsinfrastruktur des HERA-B Experimentes geliefert. Bei Laborexperimenten, die speziell darauf ausgerichtet waren, eine sogenannte Kammeralterung durch Verunreinigungen des Gassystems nachzuweisen, wurden in Heidelberg mit Produkten dieser Firma keine negativen Erfahrungen gemacht. Die Rohre von Dockweiler sind deshalb geeignet.

Kapitel 4

Aufbau und Inbetriebnahme des 98iger-Systems der Gasregelung

Dieses Kapitel beschreibt das Prototypsystem der Gasregelung, das 1998 für die Regelung von 7 Kammern des Inneren Spurkammersystems eingesetzt wurde. Der Aufbau der Anlage wurde, bis auf kleine Veränderungen, für die Konzeption des endgültigen Gassystems übernommen.
Eine Gasmischanlage gab es in diesem Jahr noch nicht. Die Versorgung der Kammern wurde durch vorgemischte Flaschen sichergestellt.

4.1 Schematische Übersicht des Aufbaus

Die Abbildung 4.1 zeigt schematisch den Gesamtaufbau des 1998 betriebenen Gassystems. Neben der Zuordnung der einzelnen Komponenten zu den verschiedenen Räumlichkeiten, werden in der Darstellung auch die Leitungslängen zwischen den verschiedenen Standorten des Systems aufgezeigt. Ebenfalls werden die von der SPS aufgezeichneten Meßwerte den verschiedenen Meßkomponenten zugeordnet.
Die Anordnung der einzelnen Standorte zueinander wird durch Abbildung 2.2 deutlich.

4.1.1 Bereitstellungsraum in der Gashütte

Im Bereitstellungsraum in der Gashütte vor der Halle stehen die Gasflaschen. Im Jahr 1998 waren dies vorgemischte Flaschen mit 50% Dimethylether (DME) und 50% Argon (1999 werden hier zwei Flaschenstationen aufgestellt, die die Mischanlage mit reinem DME und Argon versorgen). Neben magnetischen Sicherheitsventilen, die von den Sicherheitsinstallationen am DESY im Fall eines Gasalarms zentral gesteuert werden können, befindet sich hier ein System aus Handventilen. Dieses hat die Aufgabe, einen Flaschenwechsel bei laufendem System, und ohne daß Luft in das System eindringen kann, zu ermöglichen. Das Gas wird über 15 m lange Edelstahlrohre vom Bereitstellungsraum zum Mischraum in der Gashütte geführt.

4.1.2 Mischraum

- **Hinleitung:** Im Jahr 1998 wurde diese Leitung einfach im Mischraum durchverbunden. 1999 steht hier die Mischanlage. Von der Mischanlage bzw. der durchverbundenen Leitung führen 100 m lange Edelstahlleitungen in den 3. Stock des Elektroniktrailers.

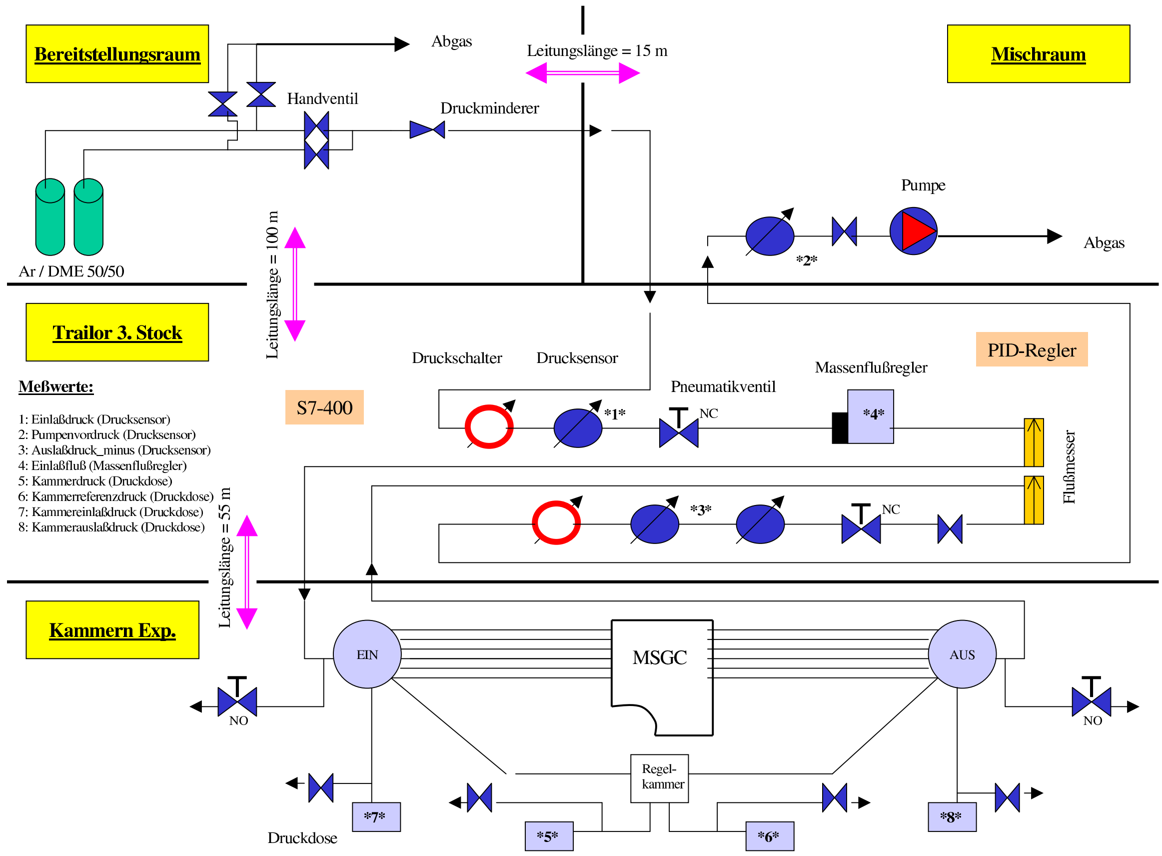

Abb. 4.1: Übersicht über das Gassystem des Jahres 1998. Die an die einzelnen Komponenten geschriebenen, in Sterne eingefaßten Ziffern symbolisieren den Meßwert, der von der jeweiligen Komponente gemessen wird. Die Zuordnung ist durch die ebenfalls in der Abbildung enthaltene Tabelle möglich.

- **Rückleitung:** In der Rückleitung befindet sich neben einem Drucksensor zur Messung des *Pumpenvordruckes* noch ein Handventil und die Systempumpe. Nach der Pumpe folgt die Abgasleitung.

4.1.3 3. Stock im Elektroniktrailer

- **Hinleitung:** Im Rack des Gasregelsystems befinden sich in der Reihenfolge des Gaslaufes ein Druckschalter (Auslöseschwelle: Druck $\geq$ 300 mbar) und ein Drucksensor, der den *Einlaßdruck* mißt. Es folgt ein Pneumatikventil (NC[1]) und der Massenflußregler, der den *Einlaßfluß* bestimmt. Schließlich ist in den Verlauf des Gasflusses ein Schwebekörperflußmesser integriert, der es gestattet, den Gasfluß direkt ablesen zu können. Vom Gasrack führen die 55 m langen Wellschläuche zur Kammerstation.

- **Rückleitung:** Von den Kammern kommend, führt der Weg des Gases wieder durch einen Schwebekörperflußmesser (optische Kontrolle) und ein Handventil, das den insgesamt möglichen Gesamtfluß steuert (unterschiedliche Einwirkung der Pumpe auf das System). Dieses Ventil ist dem Massenflußregler in der Hinleitung gleichgesetzt (siehe

[1]NC = normally closed, d.h. die Ventile sind ohne die Zuführung von Druckluft geschlossen.

hierzu Kapitel 4.5). Weiter folgen zwei Drucksensoren, die den Druck in der Auslaßleitung überwachen. Geplant war der Einsatz zweier Sensoren, um sowohl auftretende Unterdrücke als auch möglicherweise, bei Störungen entstehende Überdrücke registrieren zu können. Angeschlossen wurde allerdings im System des Jahres 1998 nur der Unterdrucksensor (Meßwert: *Auslaßdruck minus*). Schließlich wird eine zusätzliche Drucküberwachung durch einen weiteren Druckschalter (Auslöseschwelle: Druck $\geq$ -100 mbar) sichergestellt. Von dieser Stelle führt der Gasverlauf über 100m lange Edelstahlrohre zurück in den Mischraum.

4.1.4 Kammerstation

Der Aufbau des Gassystems an der Kammerstation ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

- **Hinleitung:** Die Wellschläuche reichen bis 1,6 m unter die Kammern. Dort werden sie am OTR[2]-Rahmen befestigt. Von dort aus wird die Gasversorgung des Einlaßverteilers durch ein 6mm Edelstahlrohr hergestellt. Abzweigend davon wird ein Pneumatikventil (NO[3]) eingesetzt (Befestigung ebenfalls am OTR-Rahmen), das im Falle einer Störung die Kammern belüftet. Vom Verteiler reichen 1mm Gaskapillaren in jede Kammer und zusätzlich in die Regelkammer. Ein weiteres Edelstahlrohr führt vom Verteiler zu einer Druckdose (*Kammereinlaßdruck*: ±100 mbar Range). Von dieser Leitung abzweigend befindet sich ein Handventil, das zum Spülen der Leitung nach einem längeren Stillstand benötigt wird. Der Druck in der Regelkammer wird durch zwei weitere Druckdosen bestimmt (*Kammerdruck* und *Kammerreferenzdruck*: ±1000 μbar Range). Die Kammerdruckdose wird dabei zugleich als Regeldruckdose genutzt, d.h. sie liefert den Input für den PID-Regler. Alle Druckdosen werden ebenfalls am Rahmen des OTR befestigt. Das Spülen der Verbindungsrohre zu den Druckdosen ist durch den Einsatz von Handventilen möglich.

- **Rückleitung:** Von Kammern und Regelkammer reichen 1mm Kapillaren in das Auslaßvolumen. Der Druck in diesem Verteiler wird ebenfalls gemessen (*Kammerauslaßdruck*: ±100 mbar Range). Wie schon beim Einlaßverteiler gibt es auch hier eine Gasleitung, die zu einem der Pneumatikventile am OTR-Rahmen führt, die im Störungsfall die Kammern belüften. Über die 55 m langen Wellschläuche gelangt das Gas zurück in den Trailer.

4.2 Funktionsweise des Prototypen

Die Funktionsweise der Prototypregelung verläuft nach dem gleichen Prinzip wie die in Kapitel 2.1 besprochene prinzipielle Regelung. Alle dort angesprochenen Komponenten finden sich auch im Prototypsystem. Die eingesetzten zusätzlichen Bauteile dienen einer detaillierten Überwachung des Systems und der Erfüllung von Sicherheitsanforderungen.

4.2.1 Regelvolumen

Im Gegensatz zu den Laborversuchen mit MSGC-Kammern wird im Prototypsystem der Druck in einer separaten Regelkammer (Abbildung 4.3) gemessen, die nicht als Nachweiskammer eingesetzt werden kann. Diese Druckmessung liefert den Input des PID-Reglers, der

[2] OTR = Outer Tracker: äußeres Spurkammersystem

[3] NO = normally open, d.h. die Ventile sind ohne die Zuführung von Druckluft geöffnet.

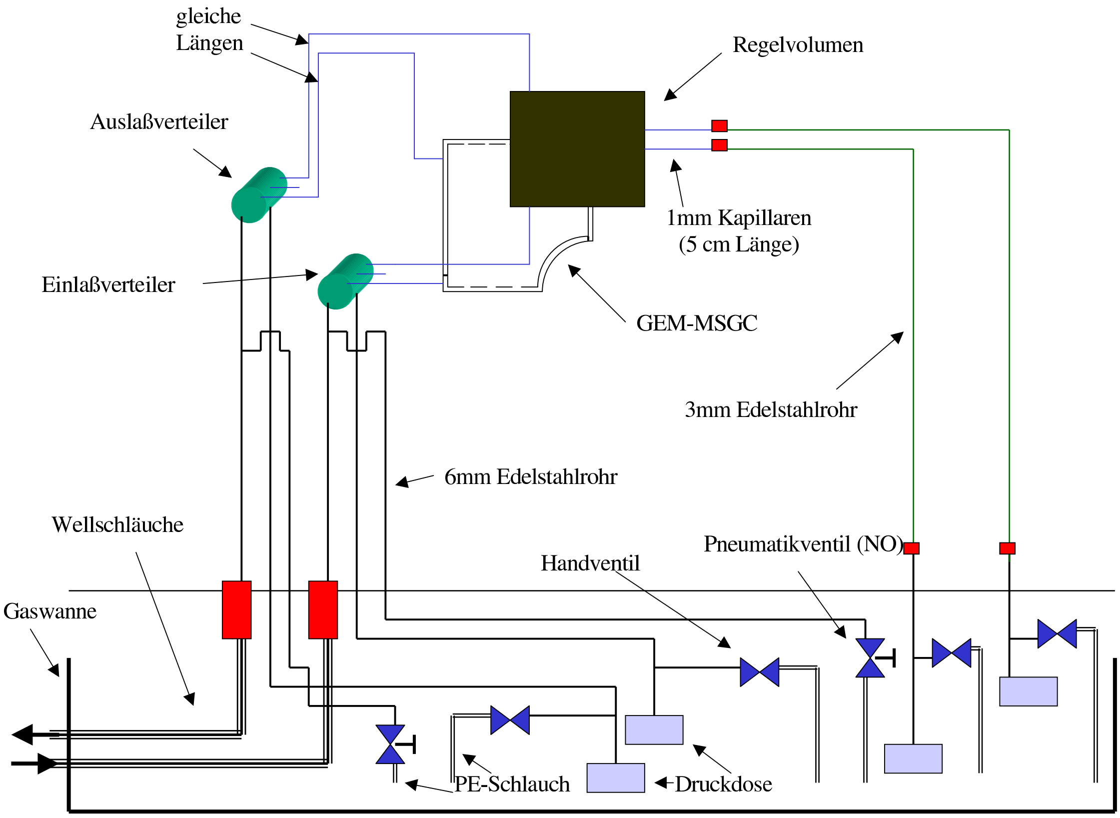

Abb. 4.2: Das Gassystem an der Kammerstation (Die Druckdosen, Pneumatikventile und Handventile sind auf einem den Outer-Tracker Rahmen simulierenden Gestell befestigt.)

einen entsprechenden Sollfluß des Massenflußreglers berechnet. Dieser Fluß wird allen Nachweiskammern und dem Regelvolumen zugeführt. Geregelt im eigentlichen Sinn wird also nur der Druck im Regelvolumen. Eine separate Druckmessung in den Nachweiskammern findet nicht statt.

Alle gemessenen Kammerdruckwerte *Kammerdruck* und *Kammerreferenzdruck* beziehen sich folglich auf das Regelvolumen.

Dieses Verfahren ist möglich, da das Regelvolumen so gebaut wurde, daß es aufgrund seiner Bauweise insgesamt steifer ist gegen Verformungen als eine Nachweiskammer. Das Regelvolumen verformt sich also bei den herrschenden Drücken weniger, es ist nicht so elastisch. Regeltechnisch ist allgemein eine Regelung umso schwieriger, je weniger elastisch ein Volumen ist. Ist es also möglich, das steifere Regelvolumen zur regeln, dann müssen automatisch auch sämtliche Kammervolumina geregelt werden. Sicherheitsbedenken bestehen nicht, da die MSGCs sich aufgrund ihrer Bauweise weiter ausdehnen können als das Regelvolumen.
Außerdem wird die Regelkammer parallel zu den Nachweiskammern angeschlossen, d.h. es werden die gleichen Kapillaren verwendet (gleich in Länge und Durchmesser). Der Druck vor und nach den Nachweiskammern bzw. dem Regelvolumen ist genau gleich, da sie von den selben Verteilervolumina versorgt werden.

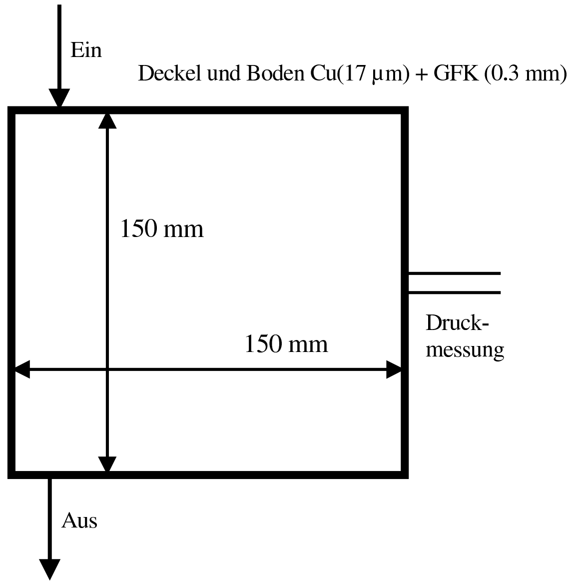

Abb. 4.3: Das Regelvolumen

4.2.2 Sicherheit des Systems

Der Begriff Sicherheit bezieht sich in diesem Zusammenhang nicht auf den Personen- oder Gebäudeschutz, sondern auf die Betriebssicherheit der Kammern (siehe Kapitel 2.3.7). Um Beschädigungen der Nachweiskammern infolge einer Störung des Gassystems möglichst ausschließen zu können, wurden verschiedene, unabhängige Sicherheiten in das System integriert, die im folgenden aufgeführt werden:

Pneumatikventile

Der Einsatz der Pneumatikventile ist essentiell für das Sicherheitskonzept der inneren Spurkammern bezüglich möglicher Schädigungen vor allem durch kritische Drücke im Gassystem. Drucklos sind die Pneumatikventile so geschaltet, daß sich das System in einem sicheren Zustand befindet. Im Gasrack auf dem Trailer ist dann sowohl die Verbindung von den Flaschen zu den Kammern, als auch die von den Kammern zur Pumpe geschlossen (NC-Ventile). Ferner befinden sich die beiden Pneumatikventile an den Gasverteilervolumina dann im geöffneten Zustand (NO-Ventile), so daß sich eventuell kritische Drücke in den Kammern gegen die Atmosphäre ausgleichen können.
Die Preßluft, die die Pneumatikventile schaltet, ist im Gasrack bis an die Steuerung der Pneumatikventile verlegt. Die Schaltung einzelner Ventile geschieht dann durch Schaltung der Steuerung mittels eines 24 VDC Signals, d.h. der drucklose Zustand ist gleichbedeutend mit einem stromlosen (signallosen) Zustand.
Folgende Zustände führen also dazu, daß das System "selbständig" in einen sicheren Zustand wechselt:

- Probleme in der Stromversorgung des Systems.
  Durch den Einsatz einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) wird 1999 dafür gesorgt, daß diese Probleme nicht mehr zu einem Ausfall des Systems führen.

- Störungen der SPS. Bei internen Störungen schaltet die SPS automatisch alle Ausgänge auf Null.
- Gemessene Störungen im System (z.B. zu hoher Druck in den Kammern). Werden kritische Werte gemessen, ist programmtechnisch dafür gesorgt, daß die SPS die Pneumatikventile in ihren normally-Zustand schaltet.
- Ausfall der Druckluft (Beschädigung der Druckluftleitungen).
- Feuer- oder Gasalarm in der Halle.
- Betätigung des Not-Aus Schalters in der Halle.

Außerdem wird so dafür gesorgt, daß sich das System, wenn es nicht in Betrieb ist, automatisch in einem sicheren Zustand befindet.

Die Schaltzeiten der Pneumatikventile betragen aufgrund der langen Druckluftschläuche etwa 3 Sekunden[4] für die Ventile an den Gasverteilern im Experiment. Die beiden Pneumatikventile im Gasrack auf dem Trailer hingegen werden wesentlich schneller geschaltet (≤ 1 sec). Dies liegt daran, daß der Verteiler der Preßluft (siehe Kapitel 3.8) sich ebenfalls auf dem Trailer befindet und sich somit erheblich kürzere Schlauchlängen bis zu den Ventilen ergeben. Die NC-Ventile auf dem Trailer können somit einen möglicherweise auftretenden Überdruck im System (z.B. falls die Flaschenstationen kritische Drücke liefern) innerhalb eines Zeitraumes von einer Sekunde sperren und somit einen ersten Schritt zu einem sicheren Zustand herstellen.

Drucksensoren

Die Drucksensoren dienen an verschiedenen Stellen (siehe Abbildung 4.1) der zusätzlichen Drucküberwachung. Die gemessenen Werte werden der SPS zugeführt und dort ständig überwacht. Über- bzw. unterschreiten die Meßwerte gewisse im Programm festgelegte Grenzen, schaltet die SPS das System in den sicheren Zustand. Die eingestellten Grenzen im Prototypsystem sind in Kapitel 4.2.2 aufgeführt.

Druckschalter

Die beiden Druckschalter stellen weitere Drucküberwachungen dar.
Der entscheidende Unterschied zu den Drucksensoren ist die rein mechanische Schalttechnik. Durch die Verwendung unterschiedlicher Techniken (Elektronik, Mechanik) wird die Möglichkeit einer fehlerhaften Interpretation der Drucksituation durch die Steuerung auf ein Minimum reduziert, d.h. sie ist in diesem Fall deutlich geringer als bei der Verwendung zweier Sensoren gleicher Art (Redundanz).
Die Schalter sind so angeschlossen, daß sie im Normalfall, d.h. wenn keine kritischen Werte gemessen werden, ein 24 Volt Signal an die SPS durchschalten. Die Grenzen, bei deren Überschreitung dieses Signal nicht mehr durchgeschaltet wird, können am Gerät eingestellt werden. Im Prototypsystem wurden dabei folgende Werte festgelegt:

[4] Die erwähnten Zeiten beziehen sich auf Versuche, die durchgeführt wurden, um die Zeit bis zum Schalten aus dem normally-Zustand zu messen. Die Abschaltzeiten (wichtig für die Herstellung eines sichern Zustandes) liegen noch darunter, da der Druck, an dem die Umschaltung erfolgt, nur wenig unter dem Druck beim Betrieb liegt.

Druckschalter in der Hinleitung:	$\leq$ 300 mbar
Druckschalter in der Rückleitung:	$\leq$ -100 mbar

Wird kein Signal mehr an der SPS empfangen, schaltet die SPS das Gassystem in den sicheren Zustand.
Sinnvoll wäre ebenfalls eine Drucküberwachung durch einen Druckschalter gewesen, der einen kritischen Unterdruck in der Rückleitung hätte registrieren können. Im Prototypsytem gab es die Möglichkeit nicht, da kein derartiger Druckschalter zur Verfügung stand.

SPS

Die SPS hat neben dem Anfahren des Systems (Kapitel 4.2.3) die Aufgabe, die gemessenen Werte zu überwachen. Bei Überschreitung gewisser im Programm festgelegter Grenzen, schaltet die SPS automatisch in den sicheren Zustand. Die überwachten Größen und die eingestellten programmierten Grenzen waren dabei die folgenden (die Meßpunkte im System sind der Abbildung 4.1 zu entnehmen[5]):

Einlaßdruck:	Sollwert $\geq$ 125 mbar	(Drucksensor)
Pumpenvordruck:	Sollwert $\leq$ -165 mbar	(Drucksensor)
Auslaßdruck(minus):	Sollwert $\leq$ -165 mbar	(Drucksensor)
Einlaßfluß:	Sollwert $\leq$ 110 ml/min	(Massenflußregler)
Kammereinlaßdruck:	Sollwert $\leq$ 3,5 mbar	(Druckdose)
Kammerauslaßdruck:	Sollwert $\geq$ -3,5 mbar	(Druckdose)
Ausgangsdruck(delta):	Sollwert $\leq$ 6,5 mbar	
Kammerdruck:	-200 μbar $\leq$ Sollwert $\leq$ 400 μbar	(Druckdose)
Kammer(E/A)druck(delta):	Sollwert $\leq$ 1,6 mbar	

Die typische Zykluszeit des Programms der SPS liegt im Bereich von 10 msec. Innerhalb dieses Zeitraumes werden die angesprochenen Werte einmal überprüft.

Der Einlaßdruck sollte im System 1999 als zusätzliche Sicherheit auch nach unten begrenzt werden.

Ausgangsdruck(delta) überwacht den Betragsunterschied zwischen dem Pumpenvordruck und dem Auslaßdruck(minus).

Kammer(E/A)druck(delta) überwacht den Betragsunterschied zwischen dem Druck im Einlaß- und im Auslaßverteilervolumen.

Die Referenzdruckdose, die ebenfalls den Druck in der Regelkammer mißt und somit eine Kontrolle für die Kammerdruckdose darstellt, wurde nicht überwacht, da sie ein Auswandern der Werte mit der Zeit aufzeigte (sich verändernde Nullabweichung nach einer gewissen Betriebsdauer). Eine Überwachung des Referenzdruckes und zusätzlich der Differenz der Werte der beiden Kammerdruckdosen ist aber sinnvoll und sorgt für noch höhere Sicherheit, wenn zwei Druckdosen benutzt werden, deren Funktionsfähigkeit in unabhängigen Untersuchungen

[5] Alle von den Druckdosen gemessenen Werte müssen noch um den hydrostatischen Druck reduziert werden (100 μbar), um die wahren Druckverhältnisse in der Kammer zu erhalten.

getestet wurde.
Der Grund für das beschriebene Verhalten der eingesetzten Referenzdruckdose könnte in einer Leitung liegen, die möglicherweise nicht völlig frei, d.h. geknickt ist.

PID-Alarme

Eine weitere zusätzliche Sicherheit in der Drucküberwachung der Kammern stellt der PID-Regler dar. Der Druckwert (Druck in der Regelkammer) wird dem PID-Regler parallel zu einem SPS-Analogeingang als Input gegeben. In das Programm des Reglers werden Alarmgrenzen über die Tastatur eingegeben. Im Fall einer Über- bzw. Unterschreitung der Grenzen wird der Alarm ausgelöst und ein Relais geschaltet. Die Schaltung des Relais (unabhängig von der SPS) führt dazu, daß die SPS das System in den sicheren Zustand schaltet.
Aus dem angezeigten Wert des Druckes am PID-Reglers errechnet man den Kammerdruck nach folgenden Prinzip:

$$\text{Druck in den Kammerm } [\mu bar] = (\text{Anzeige des PID} - 500) * 2 - 100$$

Dabei wird neben dem Range des PID (0 bis 1000 bei einer Eingangsspannung von -5 Volt bis 5 Volt[6]) auch der schwere Druck[7] aufgrund der Höhendifferenz zwischen der Druckdosenposition und der Kammer berücksichtigt (siehe Kapitel 2.3.5).
Um eine Regelung auf Atmosphärendruck zu realisieren, muß also ein **Sollwert von 550 am PID** eingestellt werden.
Die eingestellten Alarmgrenzen (± 150) entsprechen also einem vom PID tolerierten Druck in der Kammer in folgendem Bereich:

$$-300 \mu bar \leq p_{Kammer} \leq +300 \mu bar$$

4.2.3 Anfahren des Systems

Das Anfahren des Systems findet ausgehend von folgendem sicheren Zustand statt:

- Die zwei Pneumatikventile im Trailer (NC) sind geschlossen (drucklos).
- Die beiden Pneumatikventile (NO) an der Kammerstation sind geöffnet (drucklos).
- Der PID ist ausgeschaltet.
- Die Systempumpe ist ebenfalls nicht in Betrieb.

Der Benutzer hat dafür zu sorgen, daß

- sich die SPS im Betriebszustand STOP befindet und
- das Handventil auf der Auslaßseite geschlossen ist.

Das Anfahrszenario umfaßt folgenden Punkte:

1. **RUN-Zustand:** Der Benutzer schaltet die SPS in den RUN-Zustand.

[6] Daraus resultiert auch die Nullage des PID von 500 (siehe obige Umrechnungsformel).
[7] Der Begriff “schwere Druck” wird in diesem Zusammenhang gleichbedeutend mit dem des hydrostatischen Druckes verwendet.

2. **Pumpenvorlauf:** Die SPS schaltet die Systempumpe im Mischraum durch ein Relais an. Die Pneumatikventile im Gasrack auf dem Trailer sind zu dieser Zeit noch geschlossen, so daß die Pumpeneinwirkung sich nicht auf die Kammern auswirken kann. Das System hat nun 6 Minuten Zeit um den Druck in der Rückleitung vom Trailer zur Pumpe auf einen bestimmten Wert zu mindern. Gefordert sind (Meßwerte siehe Abbildung 4.1):

$$\begin{gathered} \textit{Pumpenvordruck} \leq \text{-165 mbar} \\ \textit{Auslaßdruck minus} \leq \text{-165 mbar} \\ \text{Ausgangsdruck delta} \leq \text{6,5 mbar.} \end{gathered}$$

   Wenn nach Ablauf der Zeit die gewünschten Verhältnisse noch nicht hergestellt sind, liegt eine Störung vor, und das System wechselt zurück in den sicheren Zustand. Werden die Werte erreicht, setzt die SPS das Anfahren des System fort.

3. **Schließen der Pneumatikventile auf dem Trailer:** Die beiden Pneumatikventile in den Gasleitungen auf dem Trailer werden geöffnet (Gasfluß frei), und der PID-Regler wird durch ein Relais angeschaltet. Da die beiden Pneumatikventile an der Kammerstation zu dieser Zeit noch geöffnet sind, können keine kritischen Zustände für die Kammern entstehen.
   Der Benutzer stellt den Sollwert des PID-Reglers unter den momentanen Istwert und schaltet ihn dann in den Automatikbetrieb um. So wird sichergestellt, daß der Massenflußregler auch im Automatikbetrieb zunächst geschlossen bleibt.

4. **Schließen der Pneumatikventile an der Kammerstation:** Nach Ablauf einer Wartezeit von 1 Minute, die es dem System gestattet, eventuelle kritische Drücke abzubauen, wird der Kammerdruckausgleich geschlossen. Dies geschieht durch Schließen der beiden Pneumatikventile an der Kammerstation.

5. **Kontrolle der gemessenen Werte:** Nach Ablauf eines weiteren Delays von 5 Sekunden startet das System mit der dauerhaften Überwachung aller gemessenen Werte im System. Ebenfalls wird die Auslösung eines Alarms durch den PID-Regler ermöglicht.

6. **Handventil öffnen:** Der Benutzer hat nun die Aufgabe, einerseits den Sollwert des PID auf 550 zu steigern und andererseits das Handventil in der Ausgangsleitung auf dem Trailer langsam zu öffnen. Das Ventil ist so weit zu öffnen, bis der gewünschte Gesamtfluß erreicht ist.

4.2.4 Spülen des Systems

Nach einem längeren Stillstand kommt es darauf an, die möglicherweise in das System eindiffundierte Luft (durch die offene Kammerbelüftung) wieder herauszuspülen. Dabei fährt man das Gassystem an, versorgt die Kammern aber noch nicht mit der nötigen Hochspannung. Die Spüldauer richtet sich nach der vorherigen Stillstandszeit. Eine Abschätzung über den Grad der Verdünnung ist in Kapitel 2.3.6 dargelegt.

Neben dem Betrieb des Gassystems mußte beim Prototypsystem zusätzlich ein Zugang zum Experiment[8] möglich sein, um eine vollständige Spülung aller Gasleitungen zu erreichen.

[8] Zugang zum Experiment heißt in diesem Fall Zugang zum Detektor. Dieser ist nur möglich, wenn vorher der HERA-Speichering abgeschaltet wurde und der Bereich von den Sicherheitsverantwortlichen freigegeben

Die Edelstahlleitungen, die vom Kammerpaket zu den Druckdosen reichen (Lange 1,6 m), stellen ein "totes Volumen" dar. Sie werden durch einen Betrieb des Gassystems normalerweise nicht gespült. Um dennoch eventuell hereindiffundierte Luft wieder aus diesem Systemteil zu spülen, bzw. um die vollständige Spülung nach der Installation zu gewährleisten, wurden an jede Leitung kurz vor den Druckdosen Handventile angebracht (siehe Abbildung 4.2).
Nacheinander konnte nun jeweils ein Handventil während des Betriebes geöffnet werden, so daß das Gas für diesen kurzen Moment aus der Leitung herausströmen konnte. Das Öffnen mußte dabei sehr langsam geschehen, um dem System ausreichend Zeit zu geben, sich auf die neuen Verhältnisse einzustellen. Eventuelle von der SPS überwachte Druckwerte mußten vorher einzeln ausgeschaltet werden, um keinen Alarm auszulösen, der eine Abschaltung des Systems zur Folge hätte.
Vor einer Spülung der Leitung, die zu der Kammerdruckdose reicht (diese Druckdose ist zugleich die Regeldruckdose), mußte der Eingang des PID-Reglers auf die Referenzkammerdruckdose umgeschaltet werden, um einen Betrieb des Systems zu ermöglichen.

Die endgültigen Systeme enthalten statt Handventile an diesen Stellen zusätzliche Pneumatikventile (NC), die von der SPS geschaltet werden können. So kann eine vollständige Spülung des Systems ohne einen Zugang zum Experiment jederzeit durchgeführt werden.

4.2.5 Betrieb des Systems

Neben den schon mehrfach geschilderten Überwachungsfunktionen rechnet die SPS ständig die gemessenen Analogwerte in physikalische Einheiten um. Die Zykluszeit beträgt dabei ungefähr 10 msec.

Im Fall einer Störung schaltet die SPS das System erst in einen sicheren Zustand und löst dann einen akustischen und optischen Alarm aus. Außerdem wird eine Störungs-Meldung an die slow-control des Experimentes abgesetzt.

4.3 Der installierte Aufbau des Regelsystems auf dem Trailer

Die Fotos in der Abbildungen 4.4 und 4.5 zeigen den Aufbau der Regelanlage des Prototypsystems im Trailer. Das dargestelle Rack gliedert sich in zwei Teile:

- Der untere Bereich (**Gasbereich**), der die Gasverrohrung, Pneumatikventile, Drucksensoren, Druckschalter, Schwebekörperflußmesser, den Massenflußregler und das Handventil beeinhaltet, ist durch Aluminiumplatten vom oberen Bereich getrennt. Die Abbildung 4.5 zeigt das gleiche Bild mit geöffnetem Gasbereich. In der Abbildung 4.6 ist der angesprochene Bereich gesondert fotografiert, so daß die Komponenten sichtbar werden. Links im Vordergrund erkennt man den Massenflußregler auf der Einlaßseite, in der Mitte ein Pneumatikventil und rechts Drucksensoren und -schalter. Auf dem Boden des Racks steht ein Infrarot-Gassensor, der eventuell austretendes Gas detektiert und an die Desy-Sicherheitsanlage weitermeldet. Das wichtige Handventil auf der Auslaßseite ist beim Betrieb durch eine Klappe in der Aluminiumumhüllung erreichbar (Abbildung 4.7).

wurde. Aufgrund der Strahlenbelastung (Teilchenstrahlung, Synchrotronstrahlung) und wegen der starken Magnetfelder ist der Zugang normalerweise gesperrt.

Abb. 4.4: Der Prototyp des Gasregelsystems

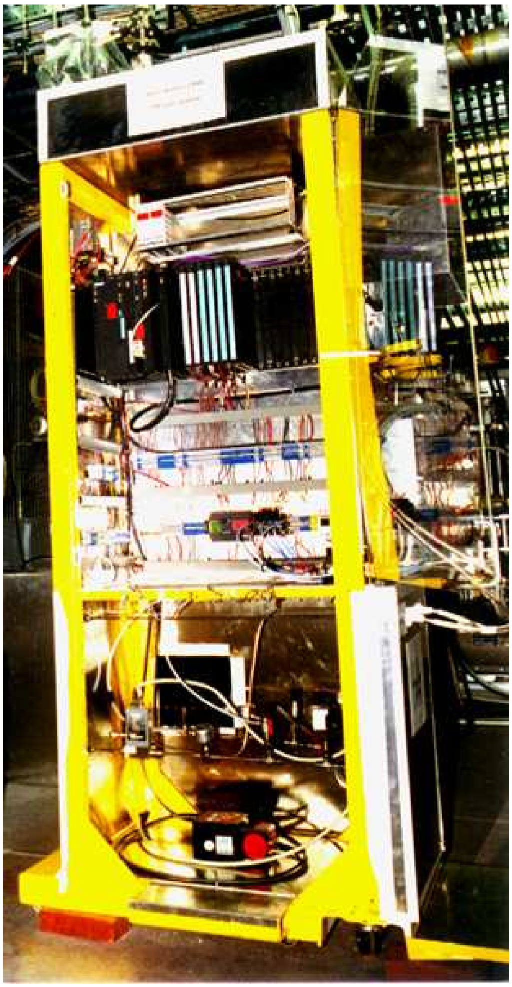

Abb. 4.5: Prototyp ohne Gasdichtungsplatte

- Der obere Bereich (**Elektronikbereich**) beeinhaltet den gesamten elektrischen Anschluß. Das "Herzstück" bildet die Speicherprogrammierbare Steuerung (Abbildung 4.4). Über der SPS sitzt die Spannungsversorgung der Druckdosen und des Massenflußreglers. In diesem Teil ist ebenfalls der PID-Regler untergebracht.

Der Elektronikbereich ist aus Sicherheitsgründen durch eine Plexiglasscheibe nach außen hin begrenzt (Griffschutz). Dadurch und durch die Trennung von elektronischem und gasführendem Bereich wird den DESY-Sicherheitsanforderungen genügt (siehe Kapitel 2.4). Da eine völlige Trennung nicht möglich ist (Massenflußregler, Drucksensoren und -schalter besitzen elektrische Anschlüsse, die in den Gasbereich reichen) wird der gesamte Gasbereich abgesaugt.

4.4 Der installierte Aufbau der Komponenten der Regelung im Detektor

Abbildung 4.8 zeigt die beiden Gasverteilervolumina. Weitere Komponenten des Systems, die sich direkt im Experiment befinden, stellt die Abbildung 4.9 dar. Man erkennt die Gaswanne,

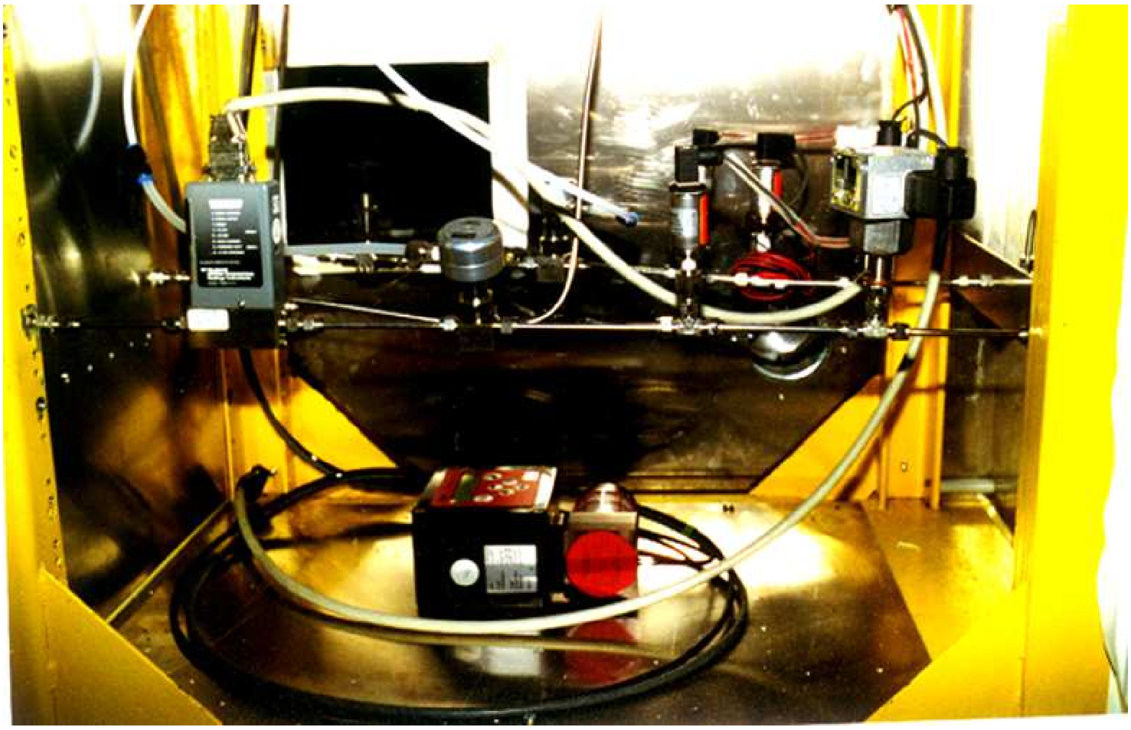

Abb. 4.6: Gasverrohrung im Rack auf dem Trailer. Sichtbar sind der Massenflußregler, die Drucksensoren und -schalter und die Pneumatikventile. Außerdem erkennt man den Infrarot-Gassensor, der zur Leckdetektion eingesetzt wird.

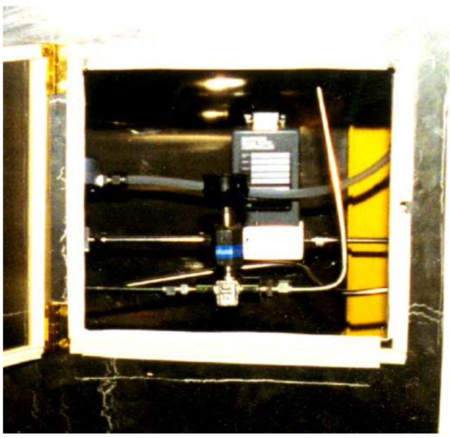

Abb. 4.7: Das Handventil auf der Auslaßseite

die durch ein Rohr ständig abgesaugt wird, Druckdosen, Gasverrohrungen und PE-Schläuche, die die Druckluftversorgung für die Pneumatikventile sicherstellen.

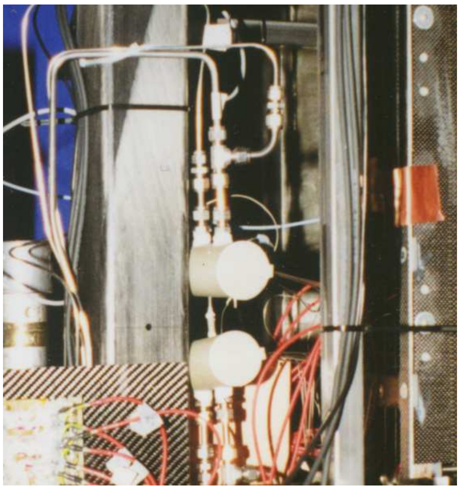

Abb. 4.8: Die beiden Verteilervolumina des Kammerpaketes

Abb. 4.9: Die Gaskomponenten unterhalb des Kammerpaketes

4.5 Option eines weiteren Massenflußreglers auf der Auslaßseite

Die eigentliche Idee bestand darin, auch in der Rückleitung im Gasrack auf dem Trailer einen Massenflußregler einzusetzen (anstelle des eingebauten Handventils). Dieser sollte im Anfahrprozeß SPS-gesteuert nach einer gewissen Zeit automatisch vom geschlossenen Zustand auf eine bestimmte Ventilöffnung geregelt werden und dann diese Öffnung nicht mehr variieren. Der Massenflußregler sollte somit gar nicht als Regler eingesetzt werden, sondern praktisch die Aufgabe eines Motorventils übernehmen. Es wäre so möglich gewesen, einen vollständig automatisierten Anfahrprozeß zu schaffen.

Der Einbau und der Test dieser Möglichkeit scheiterte an einem defekten Massenflußregler, für den kurzfristig kein Ersatz bereit stand. Laut Herstellerangaben sollte es aber problemlos möglich sein, einen Massenflußregler auch im - in der Rückleitung bestehenden - Unterdruck zu betreiben, d.h. der Verwirklichung dieser Option steht prinzipiell nichts im Wege.

Auch beim endgültigen System des Jahres 1999 wird - aus finanziellen Gründen - auf den Einsatz eines zweiten Massenflußreglers verzichtet. Zudem konnten Tests an einem System mit einem Auslaßmassenflußregler bisher nicht durchgeführt werden.

Kapitel 5

Steuerungstechnik und Software

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Aufbau und der Programmierung der S7-400. Das die Gasregelung realisierende Programm wird als Schematikblock dargestellt. Ebenfalls wird in diesem Kapitel kurz auf die für 1999 geplanten Busverbindungen eingegangen.

5.1 Die S7-400

5.1.1 Aufbau

Die S7-400 bestand im Jahr 1998 aus folgenden Bauteilen (siehe Schemazeichnung 5.1) [SIEMENS 1] [SIEMENS 2]:

(a)	PS405 20A	Stromversorgungsbaugruppe für UR1 und UR2
(b)	CPU 413-2 DP	Profibusfähige CPU (Arbeitsspeicher 72 kByte) (Ladespeicher integriert 8 kByte, max. 15 MByte mit Memory Card)
(c)	CP 443-1 TCP	Kommunikationsprozessor für TCP/IP
(d)	CP 441-2	Kommunikationsprozessor für MODBus und serielle RS232 Schnittstelle
(e)	IM 460-1	Anschaltungsbaugruppe
(f)	DI 32xDC 24V	digitale Eingänge der SPS
(g)	DO 16xDC 24V/2A	digitale Ausgänge der SPS
(h)	AI 8x14 Bit	analoge Eingänge der SPS
(i)	AO 8x13 Bit	analoge Ausgänge der SPS
(j)	IM 461-1	Anschaltungsbaugruppe
(k)	UR2	Baugruppenträger 0
(l)	UR1	Baugruppenträger 1

Das endgültige Gassystem benötigt weitere Steckkarten für digitale und analoge Ein- und Ausgänge.

5.1.2 Programmierung

Monitoring des Gassystems

In Abbildung 5.6 sind neben den Busverbindungen (siehe Kapitel 5.3) die drei PCs des Gassystems enthalten, die je nach momentaner Aufgabenstellung unter den Betriebssystemen WindowsNT (⇒ Programmierung der SPS) oder Linux (⇒ Verbindung zur Slow Control) betrieben werden können. Alle Computer sind gleichberechtigt und sind in der Lage, über

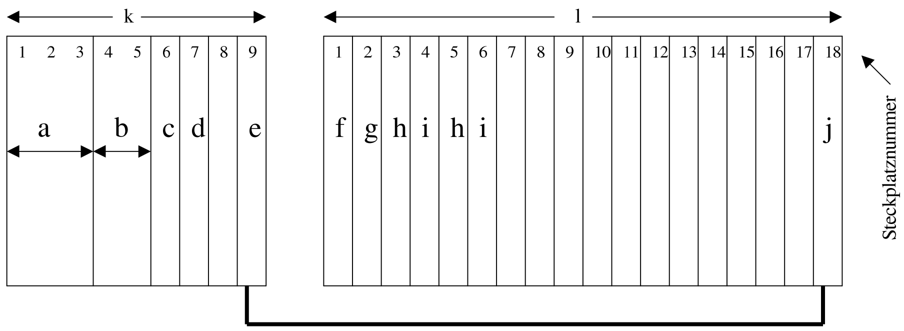

Abb. 5.1: Der schematische Aufbau der S7-400 des Jahres 1998

TCP/IP-Verbindungen mit der Slow Control auf die Daten des Gassystems, die der Slow Control direkt von der SPS ebenfalls über TCP/IP übermittelt wurden, zuzugreifen.

Der Grund auf den Rechnern neben dem notwendigen Betriebssystem WindowsNT (Voraussetzung für SPS-Programmierung) zusätzlich auch Linux zu installieren, liegt in der Forderung, alle Systeme des Gesamtdetektors möglichst einheitlich zu überwachen[1]. So wird es möglich, die Pflege, Wartung und Überwachung durch wenige geschulte Personen durchführen zu lassen.

Software

Zur Programmierung der S7-400 [SIEMENS 3] stehen drei syntaktische Varianten einer Programmiersprache (drei Editoren) zur Verfügung:

- **AWL = Anweisungsliste:** Hierbei handelt es sich um eine textuelle Programmiersprache. Die Syntax der Anweisungen ähnelt der Assemblersprache (maschinennah): auf Befehle bzw. Operationen folgen Operanden [SIEMENS 4].
- **KOP = Kontaktplan:** Der Kontaktplan ist eine graphische Programmiersprache. Die Syntax der Anweisungen entspricht einem Stromlaufplan: KOP ermöglicht die Verfolgung des Signalflusses zwischen Stromschienen über Eingänge, Ausgänge und Operationen [SIEMENS 5].
- **FUP = Funktionsplan:** Dies ist eine graphische Programmiersprache, die die von der Booleschen Algebra bekannten logischen Boxen benutzt. Auf diese Sprache wird im folgenden nicht weiter eingegangen, da sie zur Programmierung nicht verwendet wurde [SIEMENS 6].

Zur Verdeutlichung der beiden verwendeten Programmiersprachen, AWL und KOP, wird im folgenden ein kleiner Programmteil in beiden Sprachen und zudem als Flußdiagramm dargestellt (Abbildung 5.2, 5.3 und 5.4).

Dieser Programmteil erfüllt folgende Aufgabe:
Ist der Merker M0.0 gesetzt und zugleich mindestens einer der Integer-Werte A oder B größer

[1] Die gesamte Detektorkontrolle, in die auch die Gassysteme eingebaut werden, läuft auf Unix-Plattformen mit zentral organisierten User-Interfaces.

als 20, dann wird, wenn außerdem der Timer T1 noch nicht abgelaufen ist und der digitale Eingang E0.0 nicht gesetzt ist, an die Stelle M001 des Programmablaufes gesprungen.

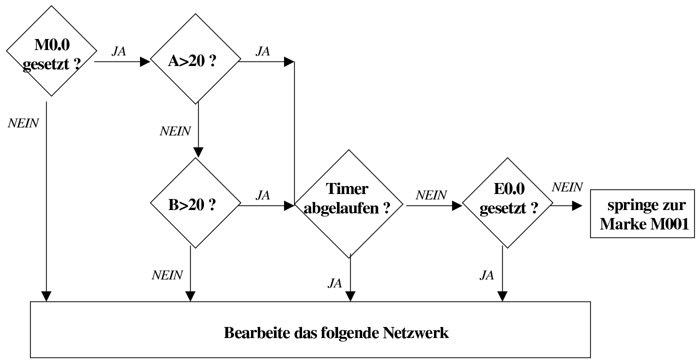

Abb. 5.2: Das Beispielprogramm als Flußdiagramm

```
U(
U      M0.0
U(
L      A
L      20
>I
)
O
```

```
U      M0.0
U(
L      B
L      20
>I
)
)
UN     T1
UN     E0.0
SPB    M001
```

Abb. 5.3: Das Beispielprogramm in der Anweisungsliste

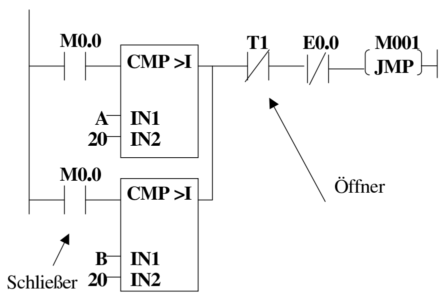

Abb. 5.4: Das Beispielprogramm als Kontaktplan

5.2 Schematikblöcke

Das Flußdiagramm[2] in Abbildung 5.5 stellt den Programmablauf in der S7-400 dar. Das Programm gliedert sich in 4 Programmblöcke:

[2]Die in diesem Diagramm verwendete Abkürzung PN steht für die verwendeten Pneumatikventile.

- **Anfangseinstellungen**: Der Organisationsbaustein OB100 enthält die Anfangseinstellungen des Systems. Er wird nach dem Start des Programms nur ein einziges Mal bearbeitet.

- **Anfahren**: Der zyklisch bearbeitete Organisationsbaustein OB1 enthält einen Teil, der - aufgrund seiner Programmierung - ebenfalls nur einmal bearbeitet wird (in der weiteren zyklischen Bearbeitung wird dieser Teil übersprungen, nachdem er einmal ausgeführt wurde). Dieser Programmteil beschreibt das Anfahren des Systems. Die Abläufe können dem Kapitel 4.2.3 entnommen werden.

- **Betriebszustand**: Der eigentliche zyklisch zu bearbeitende Programmteil (ebenfalls im OB1 enthalten) steuert den Betriebszustand des Systems. Alle überwachten Werte der Drucksensoren, Druckdosen, Druckschalter und des Massenflußreglers werden ständig mit den programmierten Toleranzvorgaben verglichen. Die eingestellten Grenzwerte sind in Kapitel 4.2.2 aufgeführt. Ebenfalls werden die Alarmausgänge des PID-Reglers überwacht. Im Fall einer Abweichung eines Wertes über die Sollwerttoleranzen hinaus, bricht das System die Bearbeitung dieses Teils ab. Das System wechselt dann in den Störungszustand, und der Betriebszustandsteil wird bei der weiteren zyklischen Bearbeitung übersprungen.
  Ebenfalls rechnet der Programmteil, der den Betriebszustand realisiert, die gemessenen Analogwerte in physikalische Größen um. Diese Umrechnung findet auch nach dem Auftreten einer Störung weiterhin statt.

- **Störungszustand**: Dieser Programmteil ist ebenfalls im OB1 enthalten. Er führt dazu, daß das System in einen sicheren Zustand wechselt. Dies wird durch eine Abschaltung des PID-Reglers, einem Schließen der Pneumatikventile im Trailer, einem Öffnen der Kammerbelüftung (Pneumatikventile im Experiment) und einer Abschaltung der Systempumpe realisiert.
  Weiterhin wird der Störungzustand durch die Auslösung eines akustischen (Signalhupe) und optischen (Lampe am Gasrack im Trailer) Alarms angezeigt. Der akustische Alarm kann durch Betätigung eines am Gasrack im Trailer angebrachten Schalters für eine Stunde unterbrochen werden. Hält nach Ablauf dieses Zeitraumes der Störungszustand weiterhin an, schaltet sich die Signalhupe automatisch wieder ein.
  Der Störungszustand kann nur durch eine Abschaltung des Programms verlassen werden. Man kehrt dann zurück zu den Anfangseinstellungen und muß das System neu anfahren. Das System ist also aus Sicherheitsgründen nicht in der Lage, selber in den Betriebszustand zurückzuwechseln.

Ein Verlassen des Programmablaufes durch Stoppen der SPS ist natürlich jederzeit möglich. In das Flußdiagramm aufgenommen sind allerdings - aus Gründen der Übersichtlichkeit - lediglich zwei Stop-Abfragen.

Das ablauffähige Programm ist in Anhang A dargestellt.

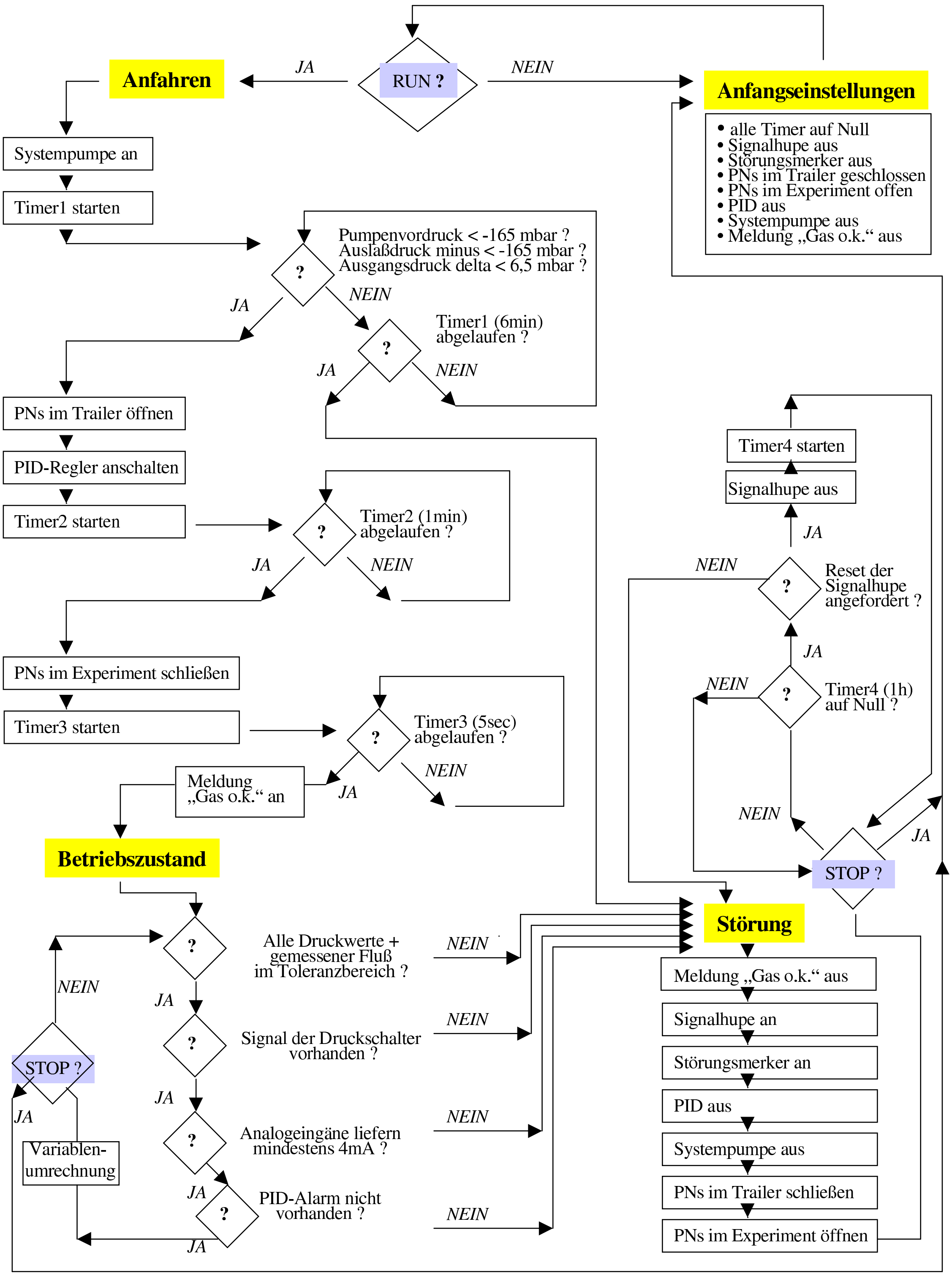

Abb. 5.5: Flußdiagramm des Programmablaufs in der S7-400

5.3 Busverbindungen

Die Busverbindungen wurden im Prototypsystem des Jahres 1998 noch nicht realisiert. Für das endgültige System ist jedoch der Einsatz folgender 3 Busverbindungen vorgesehen (in Abbildung 5.6 sind die Verbindungen dargestellt):

- **MODBus**
- **ProfiBus**
- **TCP/IP**

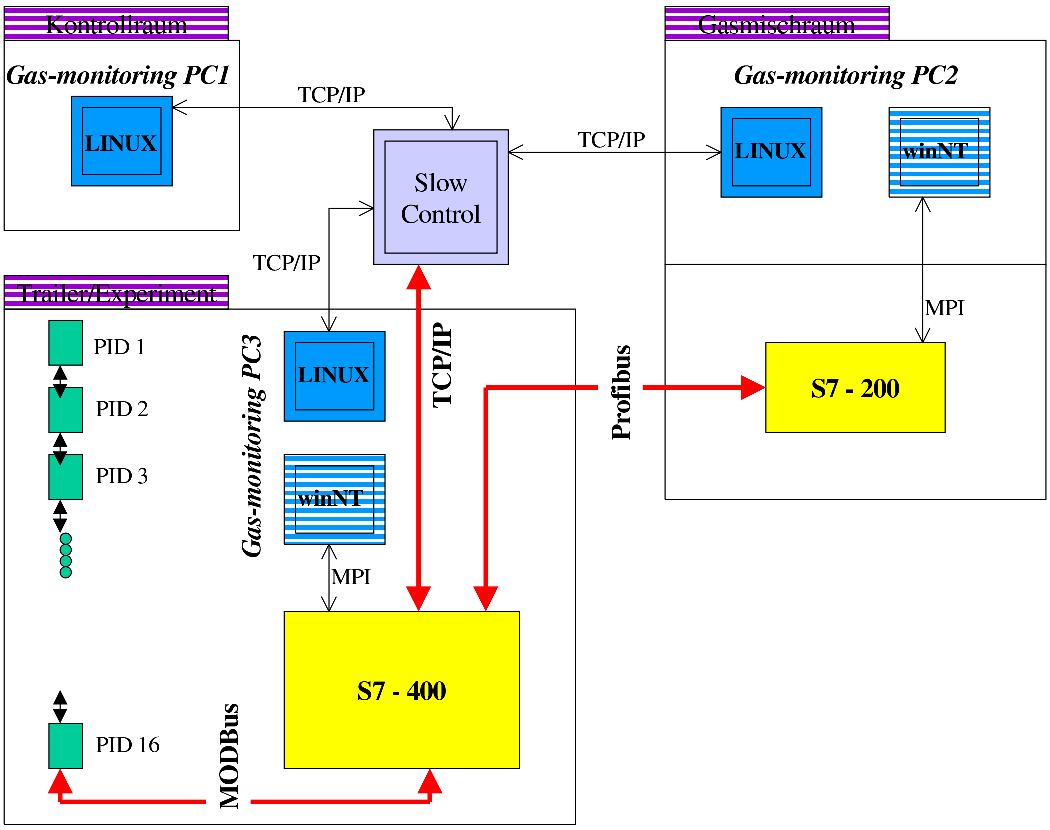

Abb. 5.6: Vorgesehene Busverbindungen des Gassystems

5.3.1 MODBus

Der MODBus [SIEMENS 7] [SIEMENS 8] ist ein serielles Protokoll, das die Verbindung zwischen den PIDs und der SPS herstellen soll. Der elektrische Anschluß erfolgt über ein 4-Leiter RS485 Netzwerk. Im einzelnen soll diese Busverbindung folgende Aufgaben übernehmen:

- Starten und Stoppen der PID-Regler
- Datenkommunikation zwischen der S7-400 und den PID-Reglern
- Alle Einstellungen der Regler (Sollwerteinstellung, Umstellung auf Automatikbetrieb, etc.) sollen über die Busverbindung direkt von der SPS vorgenommen werden können.

5.3.2 ProfiBus

Der ProfiBus stellt die Verbindung zwischen den beiden Speicherprogrammierbaren Steuerungen (S7-400 $\rightarrow$ Gasregelung, S7-200 $\rightarrow$ Gasmischung) her. Es handelt sich dabei ebenfalls um ein serielles Protokoll. So können zum Beispiel eventuell auftretende Störungen in einem Teil des Gassystems an den anderen Teil gemeldet werden. Die S7-400 kann über diesen Bus zudem ein vollständiges Zustandsprotokoll der S7-200 empfangen, deren Daten somit ebenfalls in den Datenfluß an die Slow-Control eingespeist werden können (siehe Kapitel 5.3.3).

5.3.3 TCP/IP

Über die TCP/IP-Verbindung [SIEMENS 9] [SIEMENS 10] ist eine Kommunikation zwischen der S7-400 und der Slow Control möglich. Da ein Zwischenschritt des Datenflusses über einen Gas-PC (anderes Betriebssystem) nicht nötig ist, erhält man ein einfacheres System der Datenübermittlung.

Auch alle drei PCs des Gassystems sind in der Lage über die TCP/IP auf die Daten der Slow Control und damit auch auf die des Gassystems selbst zuzugreifen (unter dem Betriebssystem LINUX).

Kapitel 6

Tests des 98iger Systems der Gasregelung

Dieses Kapitel stellt die Tests dar, die durchgeführt wurden, um die Leistungsfähigkeit des Prototypen beurteilen zu können.

6.1 Prinzip der Datennahme

Alle überwachten Meßwerte des System des Jahres 1998 werden über die RS232 Schnittstelle des Kommunikationsprozessors der S7-400 gesendet.
Die an die serielle Schnittstelle des Computers, der auch zur Programmierung der SPS dient, gesendeten Daten werden mit Hilfe eines C++-Programms gelesen und auf der Festplatte des Rechners gespeichert. Das Programm, das die Auslese der Schnittstelle des Computers realisiert, ist in Anhang C dargestellt.
Die Aufzeichnung der Meßwerte beginnt erst nach dem Pumpenvorlauf im Programmablauf. Davor werden alle Werte mit Null belegt, d.h. daß nach dieser Phase zum Beispiel der Kammerdruck in der Aufzeichnung sprunghaft auf seinen Ausgangswert von 100 μbar bei einer Regelung auf Atmosphärendruck springt. Diese Sprünge haben also nichts mit realen Veränderungen im System zu tun.

Die Meßwerte der Druckdosen sind in allen Darstellungen nicht um den hydrostatischen Druck reduziert, d.h. es handelt sich um die wahren Meßwerte der Druckdosen. Um den Druck in den Kammern zu erhalten, müssen die entsprechenden Werte um 100 μbar reduziert werden.

6.2 Messungen

Die Zuordnung der einzelnen Meßwerte zu den Komponenten und Standorten im System wird durch die Abbildung 4.1 deutlich.

Vor allem die Werte des Kammereinlaß- und Auslaßdruckes sind mit relativ großen Unsicherheiten belegt, da diese beiden Drücke mit Druckdosen gemessen werden, die einen Meßbereich von $\pm$100 mbar besitzen. Typische Meßwerte bewegen sich allerdings lediglich im Bereich von einem Millibar.

6.2.1 Langzeitmessung

Die Langzeitmessung dient dazu, einen Eindruck des Verhaltens der Systemparameter über einen längeren, ungestörten Zeitraum unter Normalbedingungen (Regelung auf Atmosphärendruck oder etwas darüber und 10 $\frac{ml}{min}$ Fluß durch jede Kammer) zu erhalten.
Die Aufzeichnung der Meßwerte wurde in diesem Fall erst nach dem Anfahren des Systems gestartet.

Abbildung 6.1 zeigt das Verhalten des Kammerdruckes über eine Stunde hinweg. Neben kurzzeitigen, unkritischen Schwankungen des Kammerdruckes um bis zu 15 μbar erkennt man, daß die Einhüllende der Druckkurve Schwankungen um typisch $\pm 4 \mu bar$ aufweist. Bei den größeren Schwankungen des Druckes handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um reale Variationen des Hallenluftdruckes, die aber sofort durch Änderung des Einlaßflusses ausgeglichen werden (siehe Abbildung 6.3 und 6.4).
Ein Vergleich der Aufzeichnungen der beiden Druckdosen, die den Druck in der Regelkammer messen, ist in Abbildung 6.2 möglich. Man erkennt, daß beide Meßkurven die gleichen Druckschwankungen aufweisen. Lediglich ein Driften des Kammerreferenzdruckes über die Meßdauer hinweg ist als Unterschied zu erkennen. Unabhängige Untersuchungen konnten zeigen, daß die andere Druckdose (Meßwert: Kammerdruck) nicht driftet. Deshalb wurde die Kammerdruckdose auch als Regeldruckdose eingesetzt.
In den Abbildungen 6.3 und 6.4 wird die Reaktion des Einlaßflusses auf Druckveränderungen deutlich. Besonders der zeitliche Ausschnitt (Abbildung 6.4) zeigt deutlich die beiden gegenläufigen Reaktionen. Man erkennt, daß der Einlaßfluß sofort (im Sekundenbereich) auf Schwankungen des Kammerdrucks reagiert und diese ausgleicht. Hier tritt vor allem der differentielle Anteil des PID-Reglers in Erscheinung, der für solch schnelle Reaktionen verantwortlich ist.
Die Ein- und Auslaßdrücke (Abbildung 6.5) zeigen nach dem Anfahren des System keine bemerkenswerten Schwankungen. Eine Regelung auf Atmosphärendruck hat - wie auch theoretisch erwartet - einen betragsmäßig etwa gleich großen Druck in den beiden Verteilern zur Folge. Unterschiede ergeben sich aus dem Range der verwendeten Druckdosen und dem Nullabgleich.
Schließlich ist in der Abbildung 6.6 das Langzeitverhalten der Auslaßdrücke dargestellt. Prinzipiell verhalten sich beide Drücke - wie erwartet - gleich. Der Pumpenvordruck weist jedoch im Gegensatz zum Auslaßdruck_minus eine Schwingung auf. Aufgrund der Pumpenvibrationen kommt es zu der Ausbildung einer Welle im Gasrohr.

6.2.2 Anfahrverhalten

Das Verhalten der Parameter des Systems beim Anfahren wird im folgenden untersucht.

Das Anfahren des Systems wurde bis zu einem erreichten Überdruck von 200 μbar in den Nachweiskammern und bis zu einem Fluß von etwa 10 $\frac{ml}{min}$ durch jede Kammer durchgeführt. So konnten die auftretenden Effekte besser beobachtet werden, als bei einer Regelung auf Atmosphärendruck.
Dies gilt auch für den in Kapitel 6.2.3 beschriebenen verfehlten Anfahrversuch.

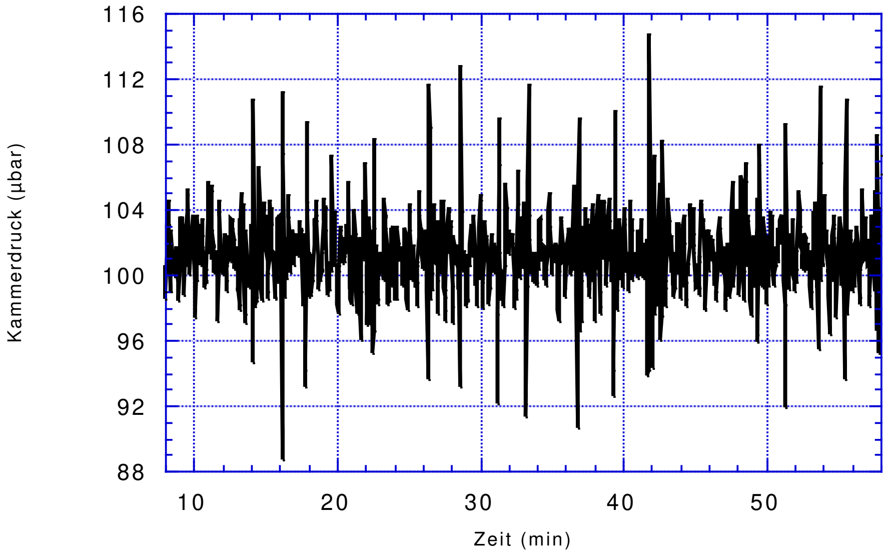

Abb. 6.1: Kammerdruck im Langzeittest

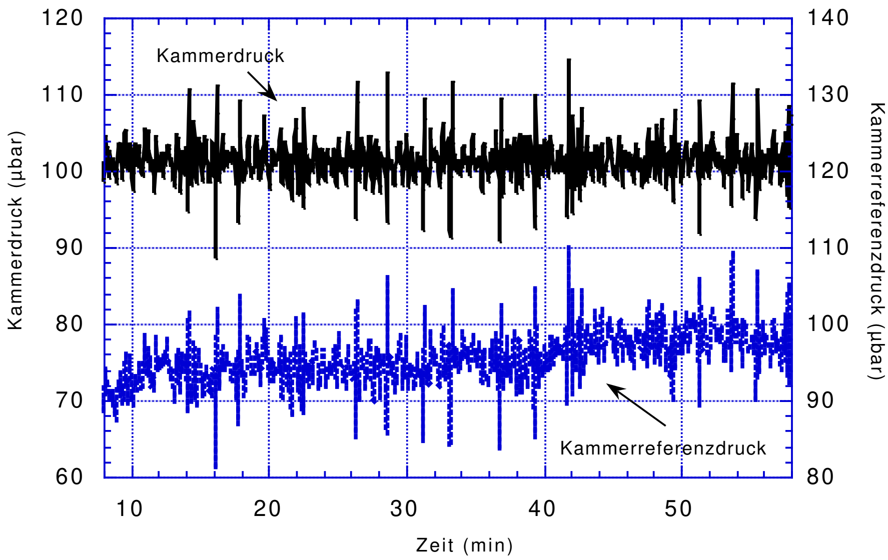

Abb. 6.2: Kammerdruck und Kammerreferenzdruck im Vergleich

Langsames Anfahren

Abbildung 6.7 zeigt den Verlauf des Kammerdruckes und des Einlaßflusses bei einem langsamen Anfahren des Systems (ca. 8 Minuten Dauer).
Das Anfahren des Systems gliedert sich in 3 Bereiche:

1. **Pumpenvorlauf des Systems** (0 min - 1,5 min): In dieser Zeit werden, wie bereits erwähnt, noch keine Meßwerte aufgezeichnet. Pumpenvorlauf heißt, daß abgewartet wird, bis die Pumpe nach dem Anschalten des Systems den Druck in der Auslaßleitung überall auf einen Wert geringer als -165 mbar reduziert hat (Abbildung 6.9).

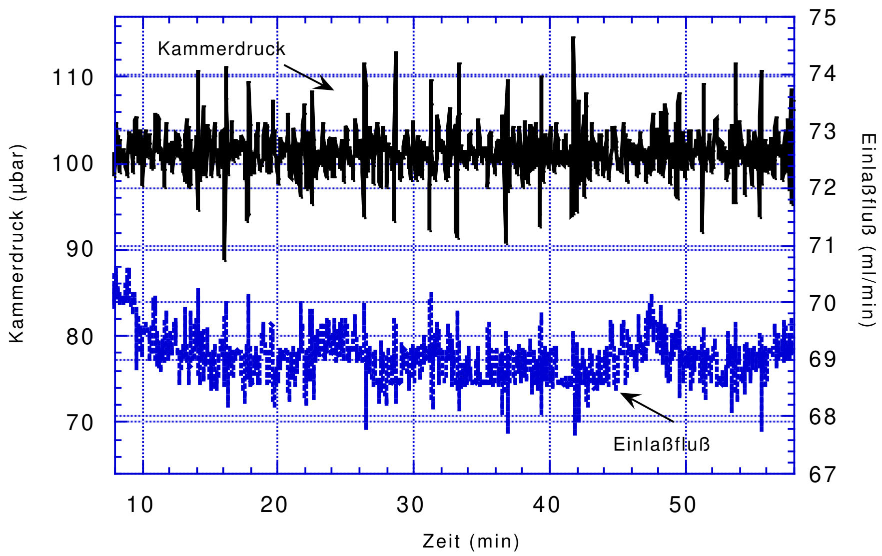

Abb. 6.3: Kammerdruck und Einlaßfluß im Langzeittest

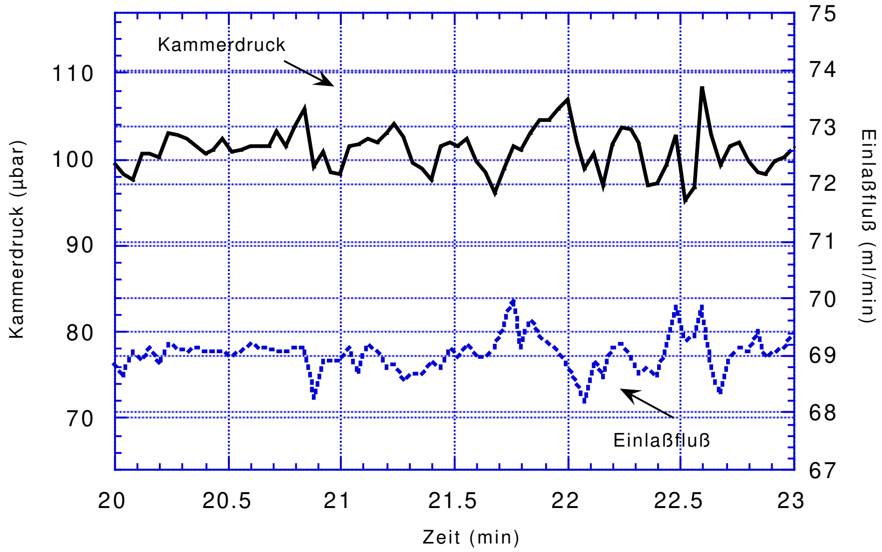

Abb. 6.4: zeitlicher Ausschnitt der Abbildung 6.2

2. **Hochregelung des Solldruckes** (1,5 min - 4min): Nachdem das Handventil in der Auslaßleitung etwas geöffnet wurde, wird in dieser Phase der Solldruck am PID in Etappen auf den gewünschten Sollwert gesteigert.

3. **Steigerung des Sollflusses** (4 min - 8 min): Ist der Solldruck erreicht, beginnt man durch langsames und stückweises weiteres Öffnen des Handventile, den Fluß durch das System zu steigern. Nach jeder Veränderung wird abgewartet, bis sich das System auf die neuen Verhältnisse eingestellt hat. Dies wird an den geringer werdenden Schwankungen des Kammerdruckes deutlich.

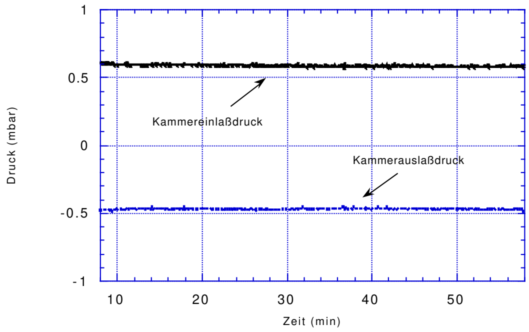

Abb. 6.5: Kammereinlaßdruck und Kammerauslaßdruck im Langzeittest

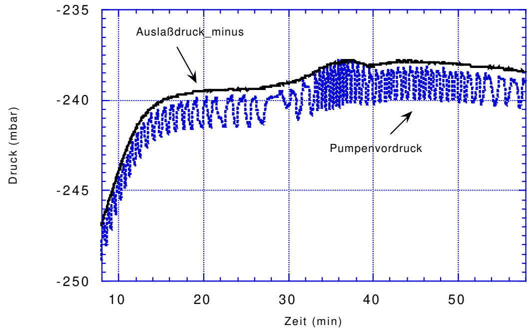

Abb. 6.6: Pumpenvordruck und Auslaßdruck_minus im Langzeittest

Ab der achten Minute hat das System sowohl den Solldruck als auch den Sollfluß erreicht, und das Anfahren ist beendet.

Die Schwankungen des Druckes im Kammereinlaß- und Auslaßverteiler während der Zeit des Anfahrens werden in Abbildung 6.8 deutlich.

Man erkennt, daß beim Anfahren zwar größere Schwankungen des Systems auftreten als beim Betriebsverhalten, alle Werte sind jedoch jederzeit weit von kritischen Grenzen entfernt.

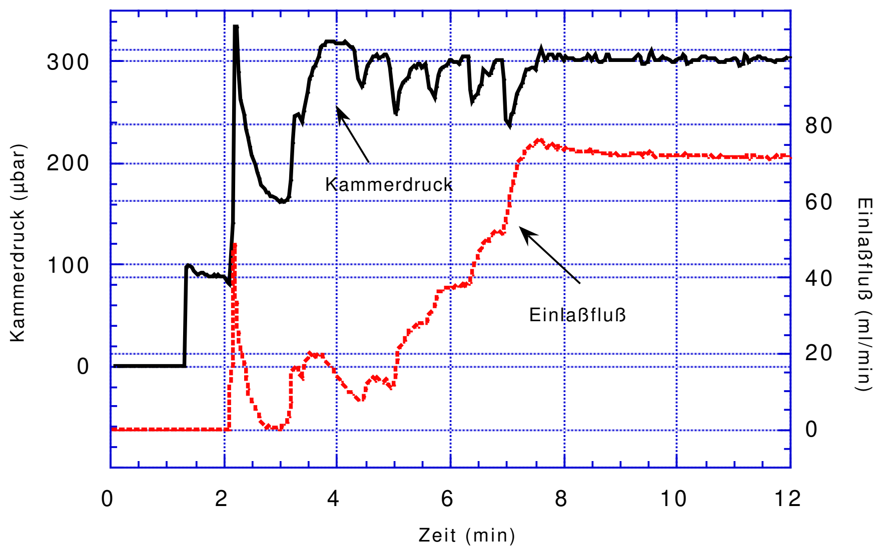

Abb. 6.7: Kammerdruck und Einlaßfluß beim langsamen Anfahren des Systems

Schnelles Anfahren

Im Gegensatz zu dem oben beschriebenen Verhalten beim Anfahren des Systems wurde bei dieser Messung die Steigerung des Solldruckes und -flusses weitgehend gleichzeitig und in größeren Schritten durchgeführt. So ist das Anfahren des Systems bereits nach 3,5 Minuten beendet.

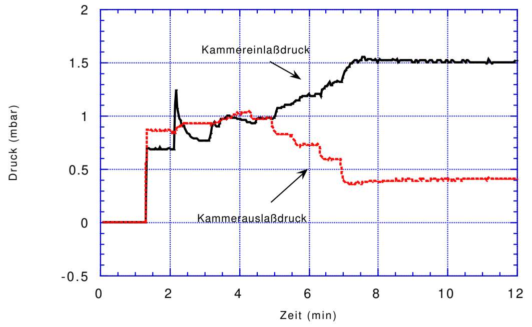

Abb. 6.8: Kammereinlaßdruck und Kammerauslaßdruck beim langsamen Anfahren des Systems

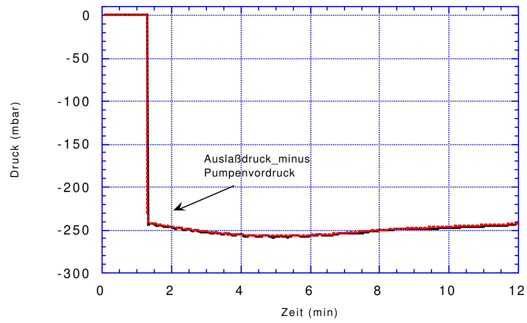

Abb. 6.9: Auslaßdrücke beim langsamen Anfahren des Systems

Abbildung 6.10 gibt einen Eindruck über den Verlauf des Kammerdruckes und des Einlaßflusses während dieses schnellen Anfahrens. Man erkennt, daß es bei dieser Vorgehensweise zu sprunghaften Steigerungen des Kammerdruckes von bis zu 250 μbar und des Flusses von bis zu 50 ml/min kommen kann. Solche starken sprunghaften Veränderungen sind möglichst zu vermeiden. Vor allem bei der Öffnung des Handventils sollten kleinere Veränderungen durchgeführt werden. So wird die Gefahr eines Scheiterns des Anfahrvorgangs minimiert.

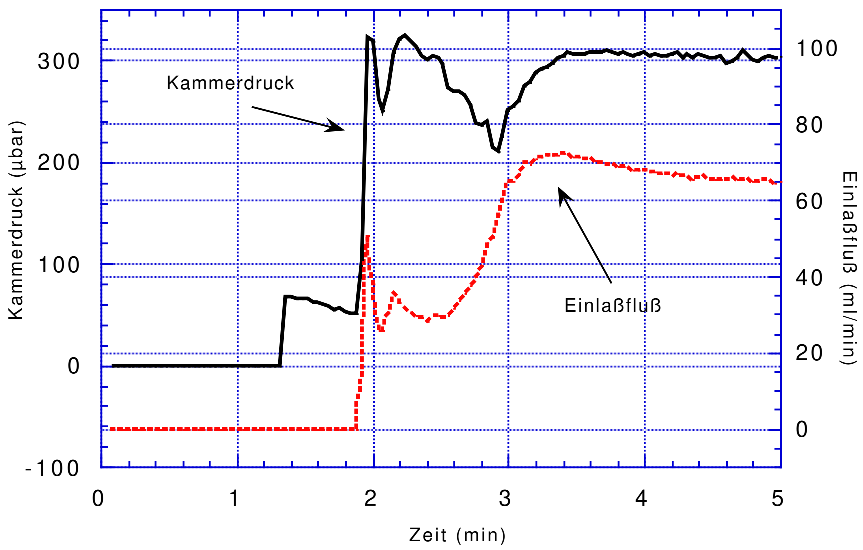

Abb. 6.10: Kammerdruck und Einlaßfluß beim schnellen Anfahrversuch des Systems

6.2.3 Störungen im System

Um das Verhalten des Systems bei auftretenden Störungen inbesondere im Hinblick auf die Kammersicherheit (siehe Kapitel 2.3.7) zu studieren, wurde in diesem Kapitel versucht, möglichst viele der möglichen Störungen "künstlich" zu erzeugen. Die Möglichkeiten wurden hierbei allerdings dadurch eingeschränkt, daß kritische Situationen für die Nachweiskammern auf jeden Fall vermieden und außerdem DESY-Sicherheitsvorschriften jederzeit eingehalten werden mußten.

Fast alle Störungen wurden von einem leichten Überdruck (200 μbar) in den Kammern aus eingeleitet. Nur so konnte das charakteristische Belüftungsverhalten nach einer auftretenden Störung beobachtet werden.

Verfehlter Anfahrversuch

Die Störung wird in diesem Fall durch ein nicht geglücktes Anfahren des Systems ausgelöst. Nachdem der gewünschte Solldruck in den Kammern erreicht ist (bis zur 3. Minute), wird in diesem Versuch das Handventil schlagartig zu weit geöffnet. Der Kammerdruck sinkt daraufhin um etwa 200 μbar (Abbildung 6.11), worauf das System mit einer Steigerung des Flusses auf über 150 $\frac{ml}{min}$ reagiert. Dieser Fluß übersteigt die in Kapitel 4.2.2 aufgeführte Grenze von maximal 110 $\frac{ml}{min}$. Das System löst einen Alarm aus und wechselt selbständig in den sicheren Zustand. Der Kammerdruck sinkt aufgrund der ausgelösten Kammerbelüftung wieder auf Atmosphärendruck und der weitere Gaszufluß wird gestoppt.

Der Versuch macht deutlich, daß auch bei einem gescheiterten Anfahrversuch keine kritischen Kammerdrücke auftreten.

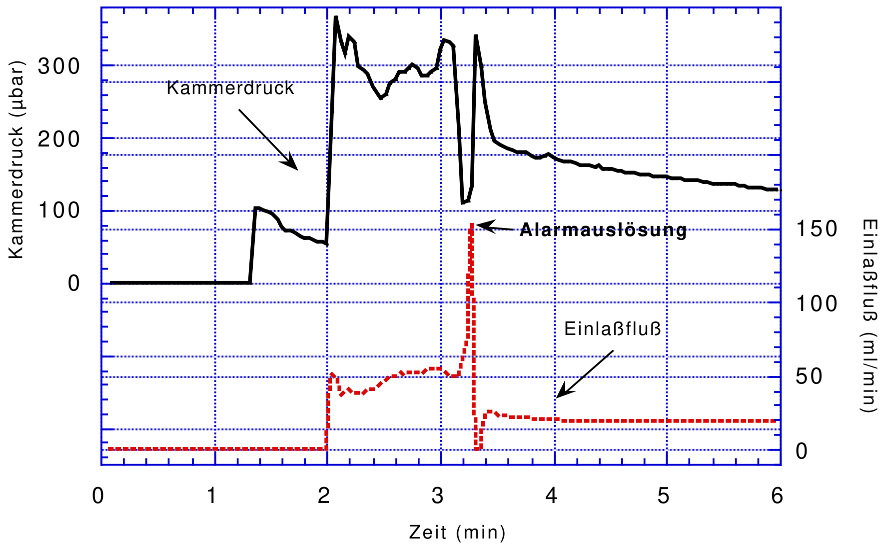

Abb. 6.11: Kammerdruck und Einlaßfluß bei einem gescheiterten Anfahren des Systems

Flasche leer

In diesem Unterkapitel wird die Situation einer Unterbrechung der Gasversorgung des Systems aufgrund einer leeren Flasche dargestellt. Simuliert wurde dieser Fall durch Schließen der Gasflasche nachdem das System vorher angefahren wurde.

Abbildung 6.12 zeigt das Verhalten des Kammerdruckes und des alarmauslösenden Parameters, des Einlaßdruckes, während dieses Versuches. Nach Zudrehen der Flasche beginnt der Druck in der Einlaßleitung zu sinken und erreicht nach ca. 10 min eine untere Toleranzschwelle. Hier wird dann softwaremäßig ein Alarm ausgelöst, der zu einer Belüftung der

Kammern führt.
Der Verlauf des Einlaßflusses während dieses Tests wird durch die Abbildung 6.13 deutlich. Nach Auslösung des Alarms sinkt der Fluß bis auf Null herab. (Die Abbildung zeigt das letztendliche Verhalten im Verlauf nicht, da die Datennahme vorher beendet wurde.)
In Abbildung 6.14 ist zusätzlich noch der Verlauf des Kammerein- und Auslaßdruckes dargestellt. Man erkennt das charakteristische, im Störungsfall auftretende Verhalten im Verlauf dieser beiden Drücke.

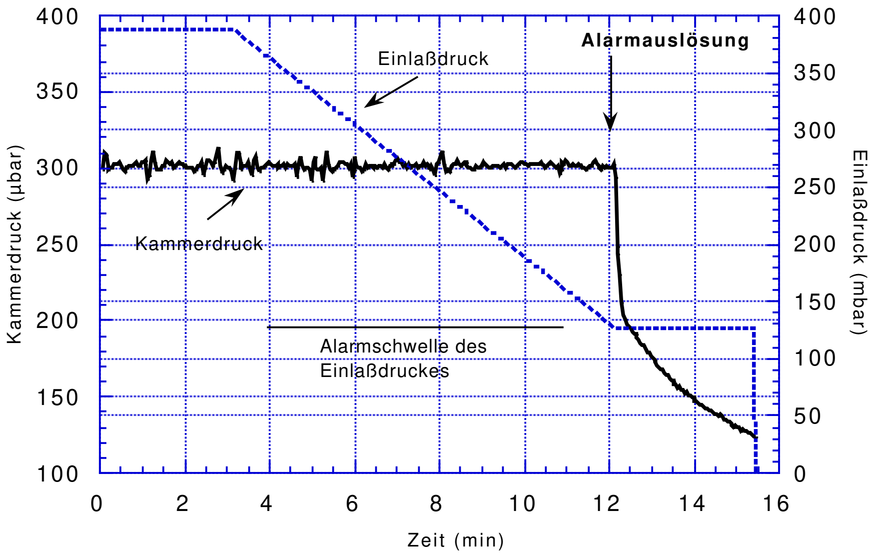

Abb. 6.12: Kammerdruck und Einlaßdruck im Störungsfall leerer Gasflaschen

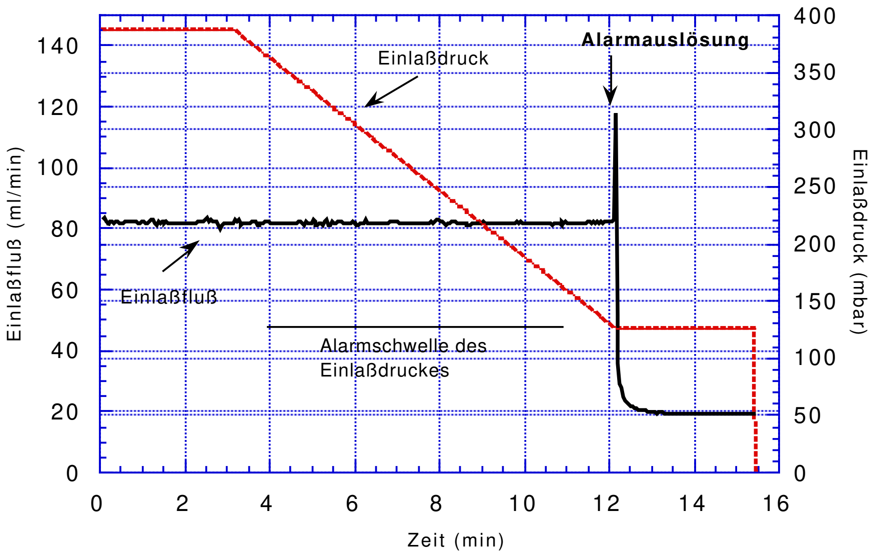

Abb. 6.13: Einlaßfluß und Einlaßdruck im Störungsfall leerer Gasflaschen

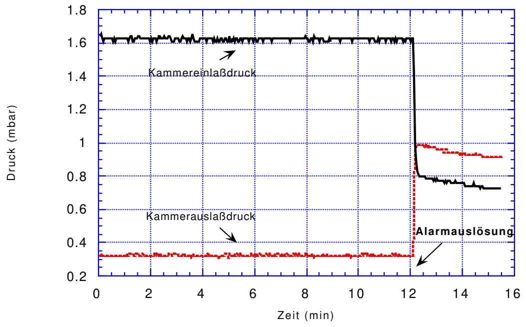

Abb. 6.14: Kammereinlaßdruck und Kammerauslaßdruck im Störungsfall leerer Gasflaschen

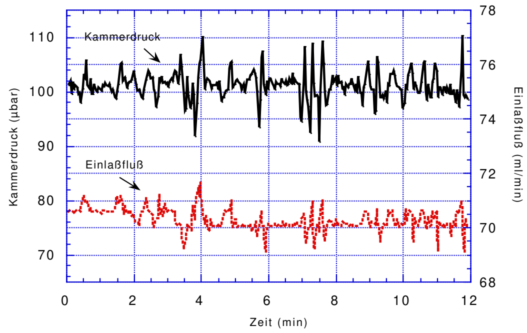

Abb. 6.15: Kammerdruck und Einlaßfluß bei Versagen der Preßluftzuführungen

Preßluft versagt

Hier wurde die Preßluftversorgung der Pneumatikventile nach Anlauf des Systems mehrmals für kurze Zeit unterbrochen. Dies wurde durch Zudrehen der Preßluftversorgungsleitung zum Crouzet-Verteiler realisiert. Da diese Maßnahmen erst nach einem Anfahren des Systems durchgeführt wurden, waren die Ventile in diesem Stadium bereits geschaltet. Auch nach dem Zudrehen der Versorgungsleitung bleiben die Ventile somit im geschalteten Zustand.
Das System zeigt keine sofort auftretenden Reaktionen. Es gibt keine Alarmauslösung. Abbildung 6.15 zeigt das unveränderte Verhalten des Kammerdruckes und des Einlaßflusses bei diesem Test.
Auch über einen Zeitraum von 30 min entweicht nicht so viel Preßluft aus den Leitungen, daß der geschaltete Zustand der Ventile nicht mehr erhalten bleibt.
Bei noch längerer Wartezeit, könnte so viel Preßluft aus den Leitungen entweichen, daß der geschaltete Zustand der Ventile nicht mehr aufrechterhalten bleiben kann und die Ventile in ihre normally-Stellung zurückwechseln. Dies hätte durch die dann auftretenden Reaktionen im System (z.B. würde der Einlaßdruck unter die Toleranzgrenze sinken) eine Alarmauslösung zur Folge.

Handventil schließen und öffnen im normalen Regelmode

Die Reaktion des Systems auf ein schnelles Schließen und anschließendes Öffnen des Handventils auf der Auslaßseite wurde durch folgende Messungen untersucht. Die Messungen wurden begonnen, nachdem vorher das System ordnungsgemäß angefahren wurde.
Das System zeigte daraufhin zwei verschiedene Reaktionen:

1. **keine Alarmauslösung:** Abbildung 6.16 zeigt das Verhalten des Kammerdruckes und des Einlaßflusses während des Tests. In Abbildung 6.18 sind zudem die Druckveränderungen im Kammerein- und Auslaßdruck aufgezeigt. Der Kammerdruck steigt zwar durch das Schließen des Kammerdruckes um etwa 80 μbar an, durch eine Reduktion des Einlaßflusses auf Null wird jedoch eine Störung des Systems verhindert. Nach dem erneuten Öffnen des Handventils sinkt der Kammerdruck um insgesamt 150 μbar (innerhalb der Alarmtoleranzgrenzen), woraufhin der Fluß wieder erhöht wird. Die Regelung schafft es, das System wieder in den normalen Betriebszustand zurückzuführen.

2. **Alarmauslösung:** Die Abbildungen 6.17 und 6.19 zeigen das entsprechende Verhalten der oben angesprochenen Größen, für den Fall, daß beim erneuten Öffnen des Handven-

tils ein Alarm ausgelöst wird. Das Schließen und Öffnen des Handventil wurde in diesem Fall sehr schnell und sofort hintereinander durchgeführt. Dadurch entsteht beim Wiederöffnen des Handventils aufgrund des über die Alarmgrenze steigenden Einlaßflusses ein Alarm, der die Kammern belüftet.

Durch eine Programmerweiterung ist dafür zu sorgen, daß das System immer in den Alarmzustand wechselt, wenn ein derartiger Eingriff (Schließen des Handventils) in das System vorgenommen wird. Zu diesem Zweck wäre eine Nullabfrage des Einlaßflusses sinnvoll, die reagiert, wenn das System längerfristig keinen Einlaßfluß liefert.

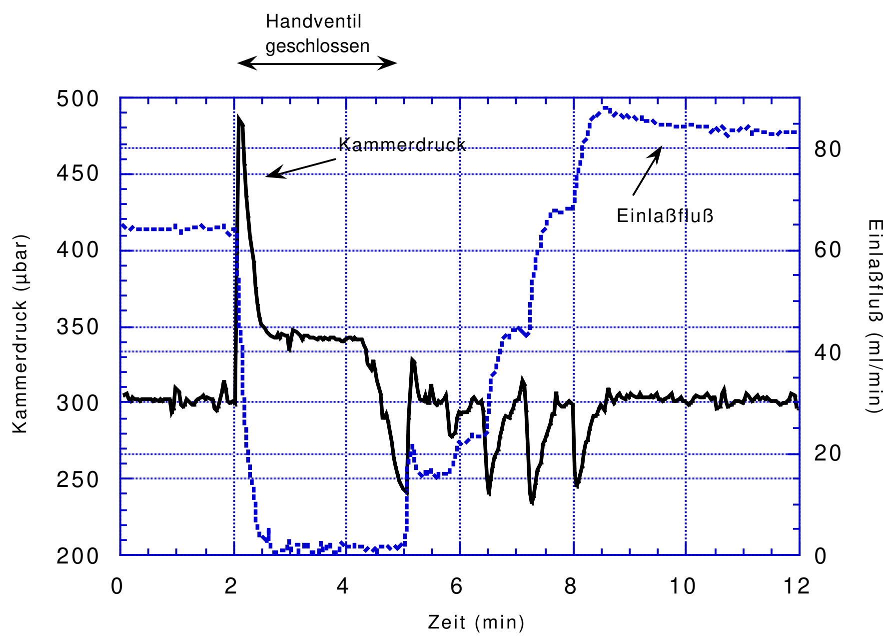

Abb. 6.16: Kammerdruck und Einlaßfluß beim Schließen des Handventils ohne Alarmauslösung

Steckerverbindung zum Massenflußregler gestört

Simuliert wurde in diesem Unterkapitel die Situation einer gelockerten oder defekten elektrischen Verbindung zwischen dem Massenflußregler und der SPS. Zur Durchführung des Tests wurde der Stecker des Massenflußreglers nach dem Anfahren des Systems abgezogen.

Abbildung 6.20 zeigt die Reaktionen des Kammerdruckes und des Einlaßflusses auf solch eine Störung. Ausgehend von einem eingeregelten Zustand (200 μbar Überdruck in den Kammern, Einlaßfluß gleich 10 $\frac{ml}{min}$ durch jede Kammer) registriert die SPS nach dem Lösen der Steckerverbindung (Zeitpunkt: 5,5 min des Meßzeitraumes) einen Meßwert des Einlaßflusses, der über dem Endausschlag des Eingangs liegt. Obwohl dieser Wert nichts mit einem realen Flußwert zu tun hat (dieser ist zu diesem Zeitpunkt bereits auf Null gefallen), schaltet sich die SPS aufgrund der Überschreitung der Flußgrenze in den sicheren Zustand. Der Kammerdruck sinkt durch die Belüftung der Kammern auf Atmosphärenniveau.
Hier wird also die Tatsache ausgenutzt, daß die SPS - im Fall einer nicht angeschlossenen Verbindung - einen von Null verschiedenen und nicht im normalen Bereich liegenden Wert als Eingang registriert.

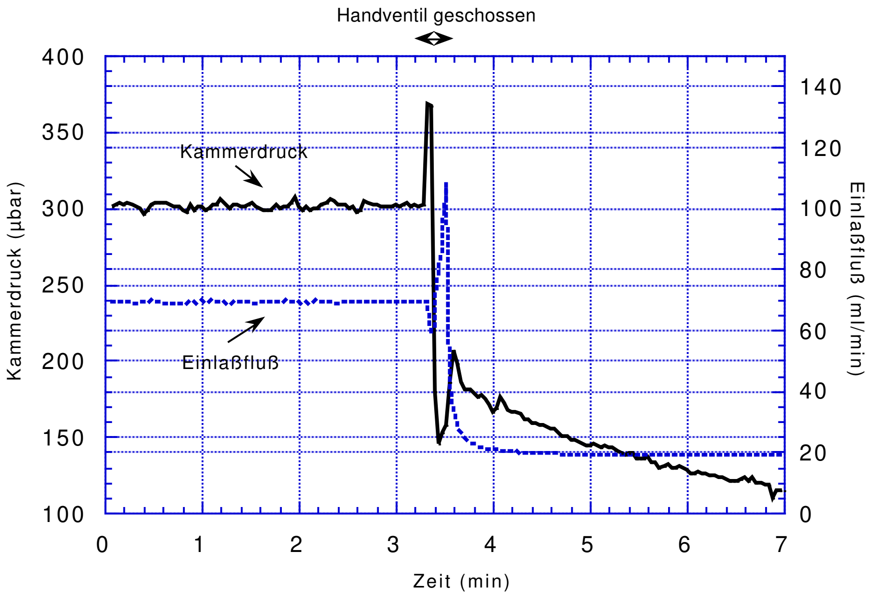

Abb. 6.17: Kammerdruck und Einlaßfluß beim Schließen des Handventils mit Alarmauslösung

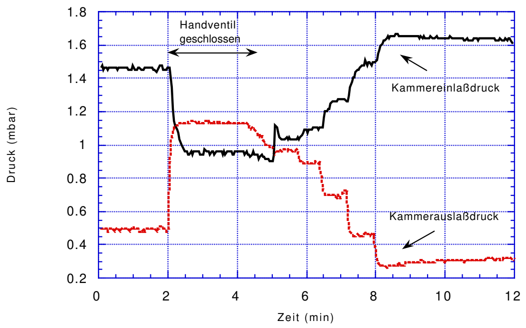

Abb. 6.18: Kammereinlaßdruck und Kammerauslaßdruck beim Schließen des Handventils ohne Alarmauslösung

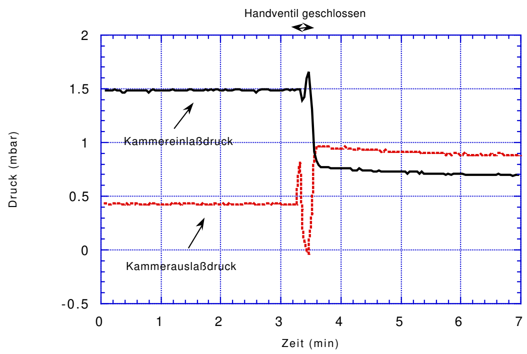

Abb. 6.19: Kammereinlaßdruck und Kammerauslaßdruck beim Schließen des Handventils mit Alarmauslösung

Ausfall eines Pneumatikventils

Der Ausfall eines Pneumatikventils im Experiment, d.h. eines der Ventile, die die Kammerbelüftung realisieren, führt zu den im folgenden dargestellten Reaktionen des Systems. Der Ausfall wurde hierbei dadurch realisiert, daß die elektrische Verbindung zur Ansteuerung der Pneumatikventile unterbrochen wurde, so daß das betroffene Ventil in seine normally-Stellung (offen) wechselt und somit die Kammer belüftet.

Getestet wurde einzeln der Ausfall beider Pneumatikventile, nachdem vorher das System auf Atmosphärendruck und einen Gesamtfluß von 65 $\frac{ml}{min}$ eingeregelt wurde:

1. **Ausfall des Belüftungsventils im Auslaßverteiler** (4 min - 6 min): Der Ausfall des Pneumatikventils auf der Auslaßseite der Kammern führt nur zu geringen Veränderungen des Kammerdruckes. Es zeigen sich lediglich kurzzeitige Schwankung um etwa 30

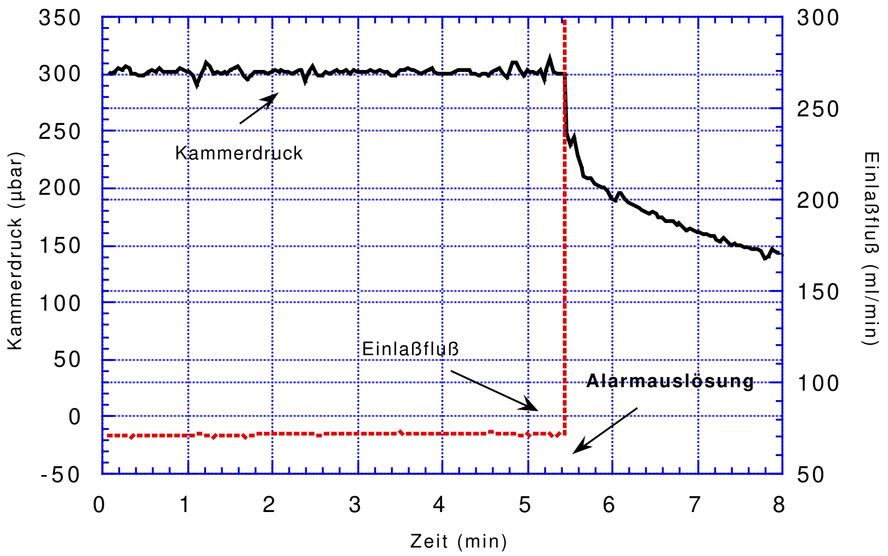

Abb. 6.20: Kammerdruck und Einlaßfluß bei Ablösung der Steckerverbindung zum Massenflußregler

μbar, die aus einem dann geringeren Einfluß der Systempumpe resultieren (Abbildung 6.21). Eine Störung des Systems tritt nicht ein. Der Fluß sinkt infolge der Belüftung, bzw. infolge des dann kurzzeitig erhöhten Kammerdruckes um etwa 10 $\frac{ml}{min}$. Der Druck im Auslaßverteiler gleicht sich nicht auf Atmosphärendruck aus (Abbildung 6.23), da die Kreislaufpumpe weiterhin Gas (jetzt eine Mischung aus Ar/DME aus den Kammern und Luft durch das offene Ventil) aus dem Auslaßverteiler abpumpt. Lediglich eine geringfügige Steigerung des Druckes ist zu erkennen. Im Einlaßverteiler (Abbildung 6.22) sind in diesem Zeitbereich nur vergleichsweise geringe Reaktionen aufgrund der Flußveränderung zu beobachten.

2. **Ausfall des Belüftungsventils im Einlaßverteiler** (8 min - 9 min): Der simulierte Ausfall des Pneumatikventils am Einlaßverteiler führt zu größeren Reaktionen des Kammerdruckes (Reduktion um 15 μbar), da hiermit sofort eine weitere Gaszuführung in die Kammern unterbunden wird (das Gas strömt in diesem Moment in die Halle). Die Abbildung 6.21 zeigt ebenfalls die resultierende Steigerung des Flusses um etwa 50 %.
   Bereits nach einer Minute wurde die Funktionsfähigkeit des Ventils wieder hergestellt, um einen weiteren Gasstrom in den Hallenbereich zu unterbinden (Sicherheitsanforderungen beim Betrieb brennbarer Gase im DESY). Das System ist in keiner Phase dieses Testzeitraumes in den Alarmzustand gewechselt.
   Im Auslaßverteiler werden keine Reaktionen festgestellt (Abbildung 6.23). Der Druck im Einlaßverteiler zeigt die gleichen Reaktionen wie der Kammerdruck (Abbildung 6.22).

   Solch eine Situation ist zwar nicht kritisch im Bezug auf eine Zerstörung der Kammern durch einen erhöhten Druck, muß aber dennoch sofort erkannt werden, um die Funktionsfähigkeit der Kammern und die Anforderungen der DESY-Sicherheit zu gewährleisten. Die Regelung auf Atmosphärendruck führt in diesem Fall aber dazu, daß das System diesen kritischen Zustand nicht erkennt. Es muß eine zusätzliche Sicherheitsgrenze einprogrammiert werden, um den Weiterbetrieb des Systems in so einem Fall zu

vermeiden.
Eine zusätzliche Überwachung des Flußgradienten würde hier eine entsprechende Sicherheit herstellen. Die auftretende Steigerung um 30 $\frac{ml}{min}$ innerhalb eines Zeitraumes von nur 30 Sekunden tritt bei normalen Schwankungen des Druckes nicht auf (Ausnahme: Anfahren des Systems). Eine in den Programmablauf aufgenommene Abfrage auf solch kritische Flußsteigerungen wird das hier beobachtete Problem beseitigen.

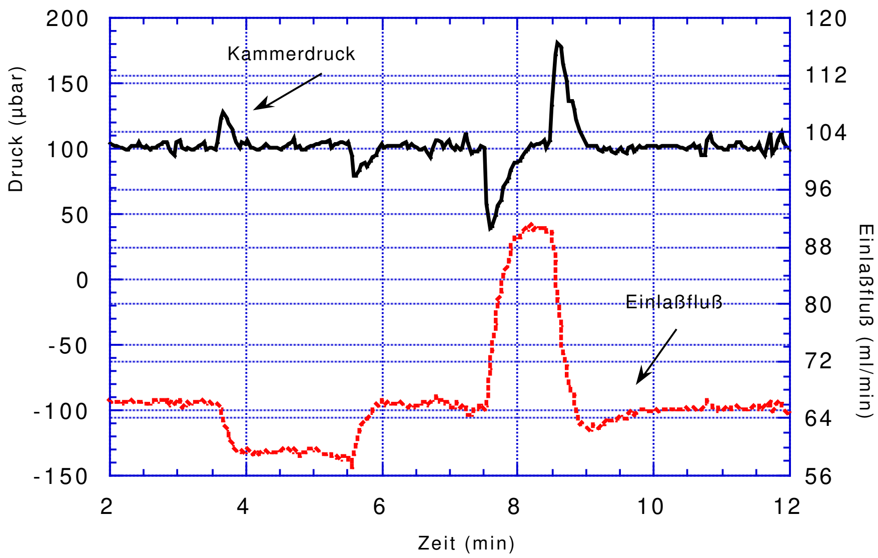

Abb. 6.21: Kammerdruck und Einlaßfluß beim Ausfall eines Belüftungsventils

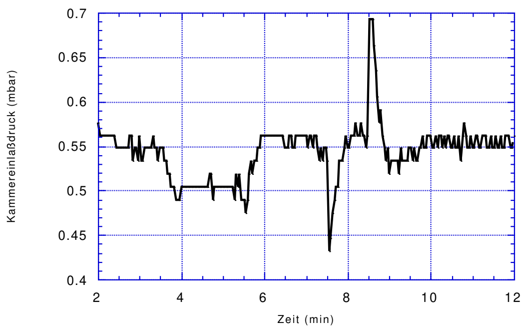

Abb. 6.22: Kammereinlaßdruck beim Ausfall eines Belüftungsventils

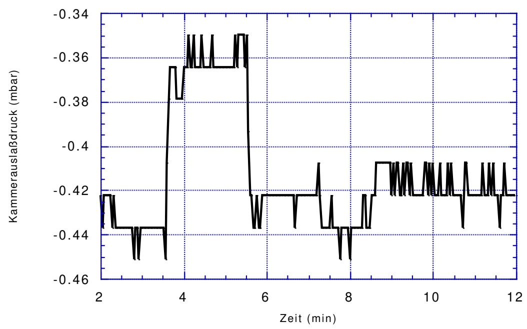

Abb. 6.23: Kammerauslaßdruck beim Ausfall eines Belüftungsventils

6.2.4 Gassystem mit erhöhten Flüssen

Neueste Erkenntnisse lassen vermuten, daß es durch einen zu geringen Gasaustausch in den Kammern zu Ablagerungen kommt. Um sich die Option eines höheren Gasflusses im Jahr 1999 offen zu halten, wurde im folgenden untersucht, wie weit man den Fluß durch das System steigern kann, ohne daß Veränderungen in der Konzeption (Kapillarengröße, Systemdrücke, etc.) nötig werden.

Angestrebt wurde hierbei eine Regelung auf einen Überdruck von 200 μbar in den Kammern, da bei solch hohen Flüssen kritische Kammerdruckschwankungen (beim Anfahren) höchstens nach unten erwartet werden. Dies resultiert aus der Tatsache, daß sich der Massenflußregler eher seinen Maximalwert erreicht als die Pumpe. Eine Regelung auf leichten Überdruck erhöht somit die Toleranzmöglichkeiten.
Um eine deutliche Flußerhöhung zu erreichen, ohne daß das System einen Alarm auslöst, mußten die Grenzwerte (siehe Kapitel 4.2.2) der Einlaßflußkontrolle, des Druckes in den Verteilervolumen und der Differenz des Druckes im Ein- und Auslaßverteiler erheblich erhöht werden.

Die Abbildung 6.24 zeigt das Verhalten des Kammerdrucks und des Einlaßflusses während des gesamten Meßzeitraumes. Beim Anfahrvorgang, d.h. während der Steigerung des Flusses auf den gewünschten Sollwert, sind lediglich Schwankungen des Kammerdruckes nach unten zu beobachten. Diese resultieren aus dem schrittweisen Öffnen des Handventils. Direkt nach dem weiteren Öffnen hat sich der Einlaßfluß noch nicht auf die neuen Verhältnisse (stärkerer Einfluß der Systempumpe) eingestellt, so daß der Druck in den Kammern kurzzeitig sinkt. Das umgekehrte Verhalten ist beim Herunterfahren des Systems zu erkennen.
Deutlich wird, daß auch bei einem Gesamtfluß von im Maximum 435 $\frac{ml}{min}$, d.h. bei einem Fluß von etwa 62 $\frac{ml}{min}$ durch jede Kammer, ein Betrieb ohne eine sichtbare Verschlechterung des Regelverhaltens möglich ist. Der ursprünglich geforderte Fluß von etwa 10 $\frac{ml}{min}$ wird also um den Faktor 6 gesteigert..
Zur besseren Darstellung des Betriebsverhaltens ist in Abbildung 6.25 ein zeitlicher Ausschnitt der Abbildung 6.24 dargestellt.
Die Abbildung 6.26 zeigt das erwartete symmetrische Verhalten des Kammereinlaß- und Kammerauslaßdruckes. Um den Maximaldruck zu erreichen, muß der Druck im Einlaßverteiler auf 5 mbar erhöht werden und der Druck im Auslaßverteiler gleichzeitig auf etwa -3 mbar reduziert werden.
Das Verhalten des Auslaßdruck_minus und des Pumpenvordruckes zeigt die Abbildung 6.27.

6.3 Abschließende Bewertung

In keiner der durchgeführten Messungen wurden kritische Situationen für die Kammersicherheit festgestellt. Bis auf zwei Fälle wurden alle auftretenden Störungen frühzeitig erkannt und die Kammern in einen sicheren Zustand geschaltet. Nach einer einfachen Veränderung des Programms können auch die beiden nicht erkannten Störungen sofort von der SPS erkannt werden (siehe Einzelergebnisse). Ferner konnten alle aufgenommenen Meßwertveränderungen durch physikalische Vorgänge erklärt werden.
Im einzelnen sind die durchgeführten Messungen folgendermaßen zu bewerten:

1. **Langzeitmessung:** Das wesentliche Ergebnis der Langzeitmessung ist die Aussage, daß das Regelsystem in der Lage ist, den Druck in den 7 Kammern auf etwa $\pm 4 \mu bar$ genau zu regeln. Zwischenzeitliche, vergleichsweise selten auftretende Schwankungen des Druckes um bis zu 15 μbar werden sofort durch eine entsprechende Veränderung des Flusses ausgeglichen.

2. **Anfahrverhalten:** Während des Anfahrvorgangs sind größere Schwankungen der einzelnen Meßwerte zu erkennen. Auch hier werden aber die Sicherheitsgrenzen jederzeit

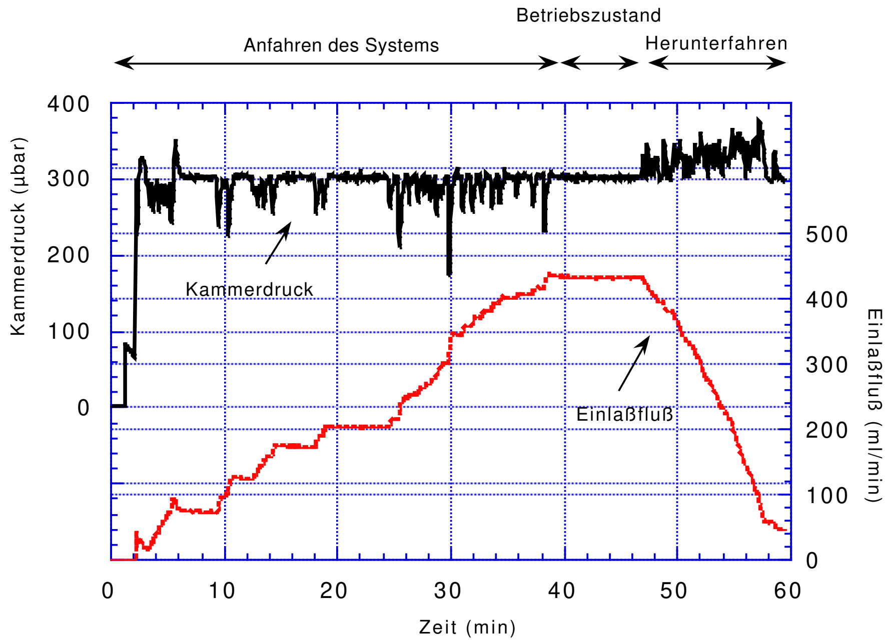

Abb. 6.24: Die Abbildung zeigt das Verhalten des Kammerdruckes und des Einlaßflusses, bei der Regelung des Systems auf Gasflüsse von etwa 62 $\frac{ml}{min}$. Das Anfahren auf diesen Sollfluß (0min - 40min des Meßzeitraumes) ist ebenso dargestellt wie der Betrieb bei den gewünschten Flüssen (40min - 48min). Außerdem wird das Verhalten beim langsamen Schließen des Handventils (50min - 60min) und damit bei wieder kleiner werdenden Flüssen deutlich.

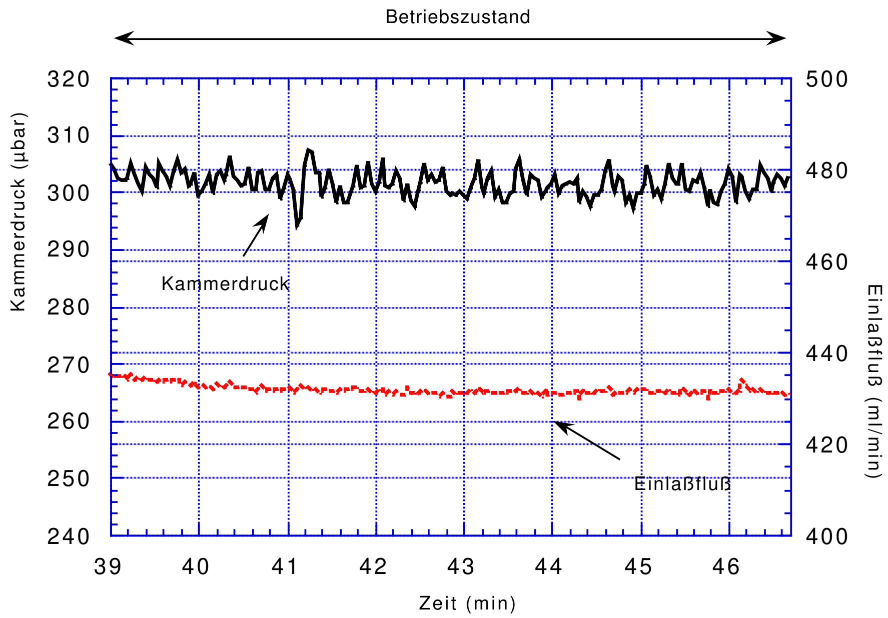

Abb. 6.25: zeitlicher Ausschnitt der Abbildung 6.24

eingehalten, bzw. das System erkennt kritische Situationen sofort und schaltet dann das System selbständig in einen sicheren Zustand.

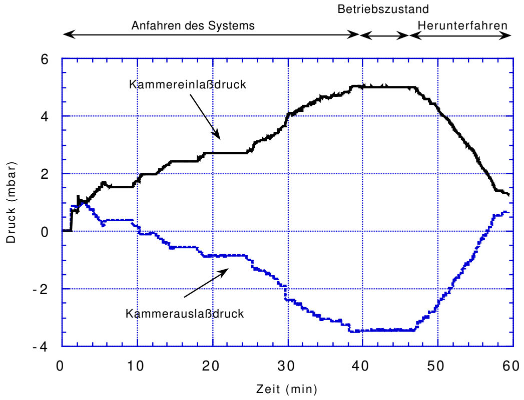

Abb. 6.26: Kammereinlaßdruck und Kammerauslaßdruck bei Kammerflüssen von bis zu 62 $\frac{ml}{min}$

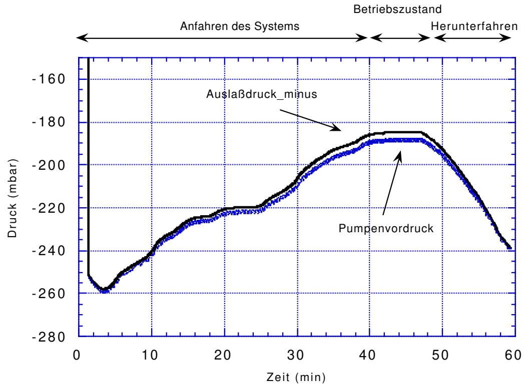

Abb. 6.27: Auslaßdrücke des Systems bei Kammerflüssen von bis zu 62 $\frac{ml}{min}$.

3. **Störungssimulationen:** Die beiden nicht vom System erkannten Störungssituationen stellen für die Sicherheit der Kammern keine Gefahr dar. Allerdings kann es durch das Anlegen der Hochspannungen an die Kammern zu Beschädigungen kommen, wenn kein ausreichender Gasfluß vorhanden ist. Bei den beiden Störungen (Handventil schließen/öffnen, Ausfall eines Belüftungsventils) wären die Kammern ohne bzw. mit vermindertem Gasfluß weiterbetrieben worden. Beide Situationen können durch folgende Programmerweiterungen ebenfalls frühzeitig erkannt werden:

   - Sollte sich der Gasfluß über einen gewissen Zeitraum (30 Sekunden) nicht von Null unterscheiden, liegt eine Störung vor.
   - Ebenfalls ist die in Kapitel 6.2.3 angesprochene Abfrage des Flußgradienten zwingend, um weiter Störungsmöglichkeiten sofort zu erkennen.

   Beide Abfrage dürfen erst nach dem Anfahrvorgang des Systems durchgeführt werden, da auch beim Anfahren solche ungewöhnlichen Situationen auftreten können.

4. **hohe Flüsse:** Die Steigerung des Flusses um etwa 600% ist mit dem vorliegenden Konzept möglich. Eine Verschlechterung der Regelmöglichkeiten ist dabei nicht zu erkennen. Für das endgültige System des Jahres 1999 ist folglich ein großer Spielraum bezüglich des Sollflusses vorhanden.

Kapitel 7

Planung des endgültigen Systems aus 16 Kreisläufen

Im folgenden sind die Veränderungen des Gasregelsystems für das Jahr 1999 gegenüber dem Prototypaufbau 1998 aufgeführt. Die relativ kleinen Änderungen haben zum Ziel, Material einzusparen und die Betriebssicherheit zu erhöhen, um den Anforderungen für die Verwendung brennbarer Gase bei DESY noch besser zu genügen. Schließlich wird eine unterbrechungsfreie Stromversorgung installiert.

7.1 Veränderungen gegenüber dem Prototypsystem

7.1.1 Trailer

Im Trailer wird ein anderer Typ der Kobold-Drucksensoren verwandt. Mit diesen Sensoren ist es möglich, relativen Über- bzw. Unterdruck mit einem einzigen Gerät zu messen. Diese Maßnahme spart analoge Eingänge der SPS. In der Auslaßleitung ist dann die - ursprünglich schon für 1998 geplante - doppelte Überwachung des herrschenden Druckes nach oben und unten möglich. Zusätzliche Sicherheit bringt die Verwendung der neuen Sensoren in der Einlaßleitung. Auch hier ist man dann in der Lage, neben kritischen Überdrücken auch Unterdrücke zu erfassen.

Die Speicherprogrammierbare Steuerung muß auf die Überwachung von 16 Gaskreisläufen ausgebaut werden. Zu diesem Zweck sind weitere analoge und digitale Ein- und Ausgabebaugruppen nötig. Außerdem sollen 1999 die drei in Kapitel 5.3 angesprochenen Bussysteme genutzt werden.

Weiterhin soll in die Gasrückflußleitung ein Sauerstoff- und ein DME-Sensor eingebaut werden. Damit wird es einerseits möglich, eventuelle Lecks in den Kreisläufen frühzeitig zu erkennen und andererseits kann die Gasmischung so ständig überwacht werden.

7.1.2 Kammerstation

Das Gassystem an den Kammerstationen des Jahres 1999 ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Deutlich werden gegenüber 1998 folgende Veränderungen:

- **Reduzierung der Edelstahlleitungen**: Von den Verteilervolumina zum Outer-Tracker Rahmen, auf dem die Pneumatikventile und die Druckdosen installiert werden, reicht

1999 nur noch jeweils eine Edelstahlleitung. Die Einsparung von Material (Strahlungslänge X_0) - speziell in Höhe der Kammern - ist günstig für die Spurrekonstruktion.

- **Reduzierung der Druckdosenanzahl**: Messungen des Druckes finden 1999 nur noch im Einlaßverteiler und im Regelvolumen (doppelt) statt. Eine Messung im Auslaßverteiler ist nicht mehr vorgesehen. Diese Maßnahme reduziert die Anzahl der notwendigen Druckdosen (finanzieller Aspekt). Gleichzeitig wird der Aspekt der Sicherheit der Kammern gegen kritische Drücke nur in einem geringen, vertretbaren Rahmen reduziert.
  Für die endgültigen Systeme werden die umgerüsteten SETRA-Druckdosen eingesetzt.

- **Verwendung weiterer Pneumatikventile**:
  Zusätzlich zu den im Prototyp installierten Pneumatikventilen werden in der Einlaß- und Auslaßleitung am Outer-Tracker Rahmen zwei weitere Ventile (NC) eingesetzt (Abbildung 7.1: PV1 und PV2). Diese steigern die Sicherheit, da eine Absperrung bei Stillstand oder beim Auftreten von kritischen Zuständen jetzt zusätzlich zu der im Trailer an dieser Stelle möglich wird. Das bedeutet insbesondere, daß sowohl in der Hin- als auch in der Rückleitung jeweils zwei Ventile liegen, so daß ein Versagen eines der Ventile keine Konsequenzen für die Sicherheit des Systems hat.
  Die Spülung der Gasleitungen zu den Druckdosen, die den Regelkammerdruck messen, wird jetzt ebenfalls durch Pneumatikventile (NC) ermöglicht (PV5, PV6). Diese ersetzen die 1998 eingesetzten Handventile. Die Gasleitungen werden hinter den Ventilen durch Blindstopfen abgeschlossen, in die ein kleines Loch gebohrt wurde. Somit wird es möglich, eine vollständige Spülung durch die Steuerung auch ohne einen Zugang zum Detektor jederzeit durchführen zu können. Das Gas tritt während des Spülvorgangs nur in sehr geringer Menge aus und wird zudem durch die unten angesprochene Stickstoffspülung inertisiert.
  Erhalten bleiben die beiden NO-Belüftungsventile (PV3, PV4)[1], die die Kammern im Störungsfall belüften.

- **Realisierung einer Stickstoffumhüllung**: Alle Stationen werden an der Kammerstation mit Stickstoff umspült. So wird den Sicherheitsanforderungen für den Betrieb von brennbaren Gasen bei DESY genügt. Eventuell austretendes Gas (gelöste Verschraubungen, Schädigung der Kammern) wird durch die Stickstoffumhüllung sofort inertisiert. Zugeführt wird der Stickstoff durch zwei Schläuche, die oberhalb des Kammerpaketes enden. Durch eine um die Kammerstation gelegte, selbstverlöschende und schwer entflammbare Folie wird der Stickstoff bis in die Gaswanne am OTR-Rahmen geleitet.

7.1.3 Programmänderungen

Neben den in Kapitel 6.3 beschriebenen Programmänderungen, die erforderlich sind, um weitere Störungssituationen frühzeitig zu erkennen, ist es sinnvoll folgende Überwachungen mit in das Programm aufzunehmen:

- Der Meßwert der Kammerreferenzdruckdose sollte ebenso wie der der Kammerdruckdose nach oben und unten begrenzt werden. Die Sollwertgrenzen sollten dabei die gleichen sein (siehe Kapitel 4.2.2).

[1]Bei Versagen eines der Belüftungsventile kann sich der Kammerdruck im Störungsfall trotzdem immer über das verbleibende Ventil abbauen, vorausgesetzt, Hin- und Rückleitung sind dicht. Auch hierbei ist man also gegen das Versagen nur eines der Ventile abgesichert.

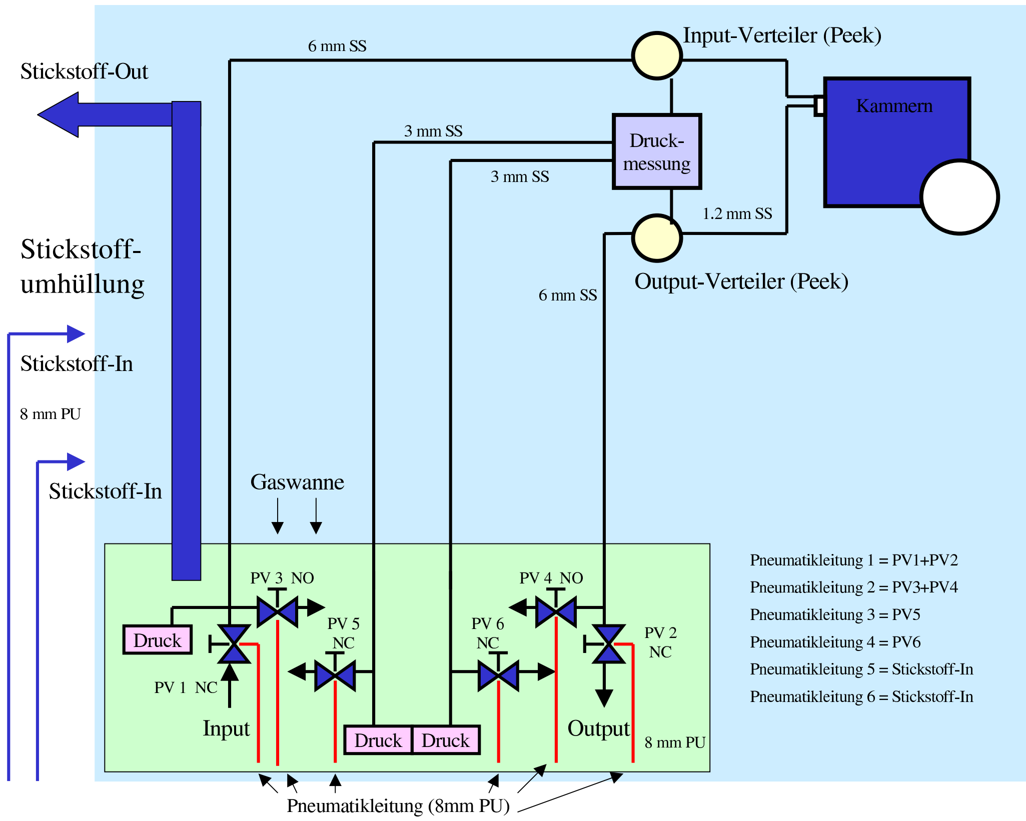

Abb. 7.1: Gasinstallationen an den Detektorebenen im Jahr 1999 (Zeichnung: H.-B. Dreis)

- Eine Überwachung des Differenzwertes zwischen den Druckmessungen in der Regelkammer bringt zusätzliche Sicherheit. Der Betrag der Differenz sollte einen Wert von 20 μbar nicht überschreiten.
- Durch die Verwendung des oben angesprochenen neuen Typs der Kobold-Drucksensoren wird eine Drucküberwachung in der Ein- und Auslaßleitung nach oben und unten möglich, die in den Programmablauf zu integrieren ist.

7.1.4 Gasmischanlage

Für den Betrieb des endgültigen Systems im Jahr 1999 kommt die Gasmischanlage zum Einsatz.
Ein Betrieb aller Kammern durch vorgemischte Flaschen ist erstens nicht möglich, da eine Versorgung des gesamten Systems innerhalb von nur etwa einer Stunde einen Flaschenwechsel erfordern würde. Zweitens ist es durch den Einsatz der Mischanlage möglich, eventuelle Variationen im Gasmischungsverhältnis jederzeit durchführen zu können.

7.2 Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV)

Allgemeines Ziel ist es, einen möglichst fortdauernden Betrieb des Gassystems sicherzustellen. Jede Abschaltung birgt die Gefahr einer Verunreinigung des Kammergases durch Diffusion

(vor allem N_2 und O_2), deren Ausmaß schwer abzuschätzen ist. Sicherheitshalber ist ein weiterer Kammerbetrieb nach einer Abschaltung damit erst möglich, wenn das System vorher gespült wurde.
Folgende Ereignisse führen zu einer Abschaltung des Gassystems des ITR:

1. Stromausfall
2. Betätigung von "Not-Aus" in der Halle
3. Gasalarm
4. Feueralarm

Die Gründe 2-4 für eine Abschaltung können aufgrund sicherheitstechnischer Erwägungen nicht eliminiert werden. Um die Anzahl der Ausfälle auf ein Minimum zu reduzieren, können aber wenigstens die Unterbrechungen durch Stromausfälle durch den Einsatz einer USV eliminiert werden.
Sowohl für die Gasregelung (Abbildung 7.2) als auch für die Mischanlage (Abbildung 7.3) wird deshalb eine unterbrechungsfreie Stromversorgung realisiert.
Alle anderen oben genannten Gründe führen auch weiterhin zu einem Wegschalten der Spannungsversorgung des Systems.

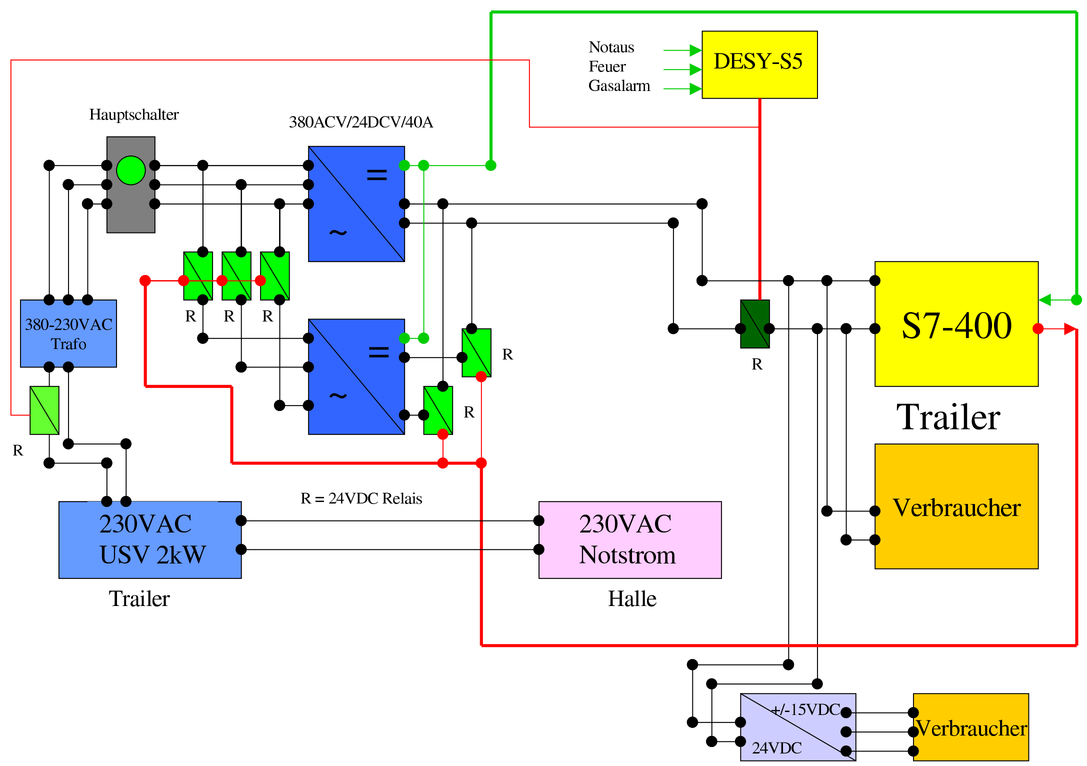

Abb. 7.2: LV-Versorgung der Gasregelung (Zeichnung: H.-B. Dreis)

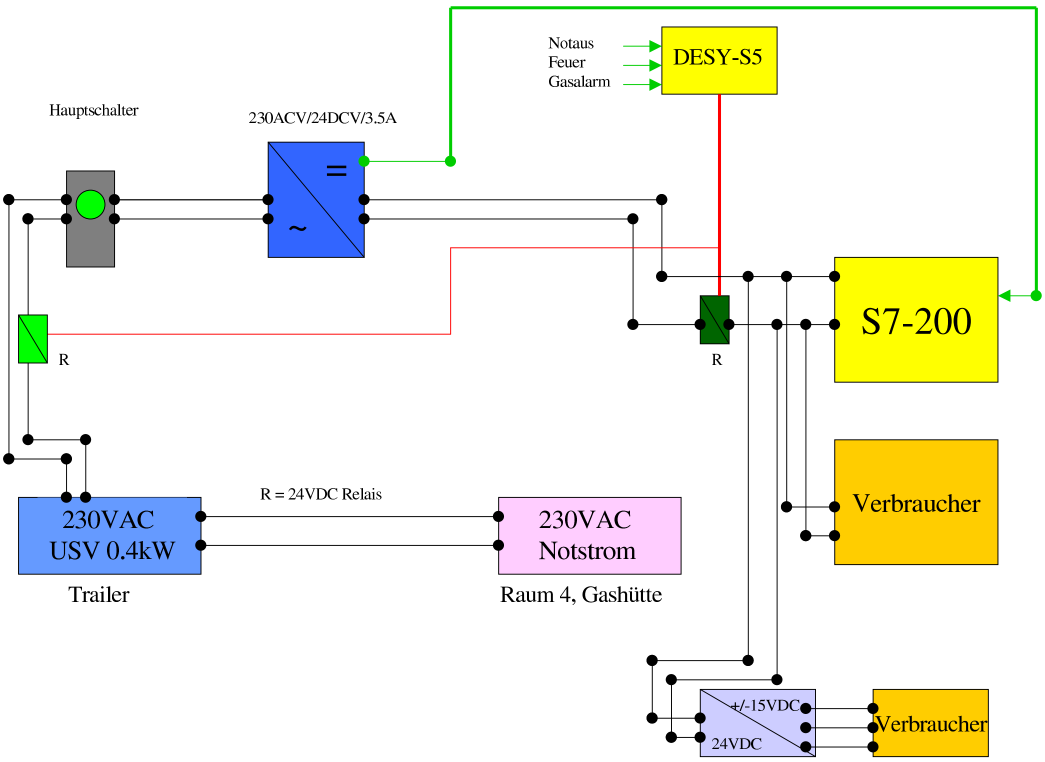

Abb. 7.3: LV-Versorgung der Gasmischanlage (Zeichnung: H.-B. Dreis)

Kapitel 8

Aufbau und Test der Gasmischanlage

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Aufbau und der Inbetriebnahme der Gasmischanlage, die 1999 die Gasversorgung [50% Argon, 50% Dimethylether (DME)] der Kammern sicherstellen wird.

8.1 Anforderungen an die Komponenten

Die für die Gasmischanlage ausgewählten Geräte müssen die in Kapitel 3.1.1 gestellten Anforderungen erfüllen. Die Unempfindlichkeit gegenüber Magnetfeldern ist in diesem Fall allerdings nicht relevant, da sich die Mischanlage in der Gashütte befindet. Besonders wichtig hingegen ist der Punkt der Vibrationsunempfindlichkeit, da in der Mischanlage ebenfalls die Systempumpe untergebracht ist und sich deren Vibrationen auf alle Teile in der Anlage auswirken.
Außerdem müssen die in Kapitel 3.1.2 genannten Anforderungen bezüglich der in den Komponenten verwendeten Materialien erfüllt werden.

8.2 Auswahl der Hardware

Zusätzlich zu den in Kapitel 3 bereits diskutierten Komponenten mußten noch Entscheidungen über die folgenden für die Gasmischanlage wichtigen Komponenten[1] getroffen werden.

8.2.1 Faß für die Mischung

Das Mischfaß in der Gasmischanlage (Volumen = 30 Liter) dient unter anderem dazu, ein möglichst konstantes Druckpotential herbeizuführen, das für die Regelung benötigt wird. Zudem hat es die Aufgabe, eventuelle Schwankungen der Gaszusammensetzung, die durch die direkte Verwendung des durch zwei Massenflußregler gebildeten Gasgemisches auftreten können, auszugleichen.
Der Einsatz des Puffergefäßes führt dazu, daß das in Kapitel 2.3.4 angesprochene Zusammenspiel der Schwingungen im Gasregelsystem und in der Gasmischung sich nicht so stark auswirkt, da immer ein gewisses Puffervolumen an gemischtem Gas vorhanden ist. Die mögliche

[1] Im Anhang D befindet sich eine Zusammenstellung der ausgewählten Hardware mit genauer Hersteller- und Produktbezeichnung.

Verwendung eines Druckminderers hinter den Massenflußreglern in der Mischanlage könnte ein konstantes Druckpotential nicht unter allen Umständen bereitstellen. Der Druckminderer würde die Zeitkonstante T_1 (siehe Kapitel 2.3.4) verringern, wenn zum Beispiel in den Regelsystemen innerhalb eines kurzen Zeitraumes viel Gas benötigt werden würde.
Dem Gassystem steht also durch die Verwendung dieses Puffergefäßes (Abbildung 8.1) ein wohldefiniertes Gasgemisch unter einem gleichbleibenden regelbaren Druck zur Verfügung.

An das Mischgefäß sind besonders hinsichtlich der Reinheit des Innenraumes hohe Ansprüche zu stellen. Eventuelle Verschmutzungen in diesem Bereich würden sich in das gesamte Gassystem ausbreiten und zu einer dauerhaften Schädigung der Nachweiskammern führen.
Zur Erfüllung dieser Anforderung wurde das Mischgefäß von einer Spezialfirma elektropoliert.

Bezüglich der Verwendung als Druckgefäß müssen an das Faß folgende Ansprüche gestellt werden:

- Die in Deutschland geltenden **Normen für Druckgefäße** müssen eingehalten werden, d.h. für das Produkt aus Druck und Volumen muß gelten

  $$P * V \leq 200lbar.$$

  Dies ist bei dem eingesetzen Faß mit V = 30 Liter und P_{max} = 6,5 bar ($\Rightarrow 195lbar$) der Fall.
  Die Überströmventile (Kapitel 8.2.3) lassen zudem nur einen maximalen Überdruck im Faß von 1,7 bar zu. Durch die Regelung bzw. den Einsatz der bekannten sicherheitsrelevanten Geräte (Drucksensoren, Druckschalter) wird außerdem dafür gesorgt, daß der Faßdruck höchstens 500 mbar Überdruck erreicht.

- Die DESY-Sicherheitsvorschriften verlangen weiterhin die Einhaltung der **TÜV-Normen**, d.h. es muß einen Nachweis über den als maximal zulässig deklarierten Druck (6,5 bar) geben. Dieser Nachweis wird durch das Protokoll der Druckprobe der Herstellerfirma erbracht.

8.2.2 Handventile

Alle in den Handventilen enthaltenden Teile dürfen nur aus den für das Gassystem zugelassenen Materialien bestehen.
Die ausgewählten Handventile der Firma Parker erfüllen diese Forderung. Sie sind bis auf den Schließmechanismus baugleich mit den ausgewählten Pneumatikventilen (Kapitel 3.8), d.h. der enthaltene Faltenbalg ist der gleiche. Durch die Auswahl dieses schon durch Komponenten im Gassystem vertretenden Herstellers wird die Anzahl verschiedenen Hersteller minimiert.

8.2.3 Überströmventile

Die Überströmventile dienen an verschiedenen Stellen der Mischanlage dazu, kritische Drücke, die aufgrund einer Fehlfunktion der Drucksensoren und -schalter möglicherweise nicht erkannt wurden, abzubauen. Der Einsatz steigert die passive Sicherheit des Systems.
Die einzusetzenden Ventile müssen eine TÜV-Abnahme besitzen und verblombt werden, um

Abb. 8.1: Das Faß der Gasmischanlage

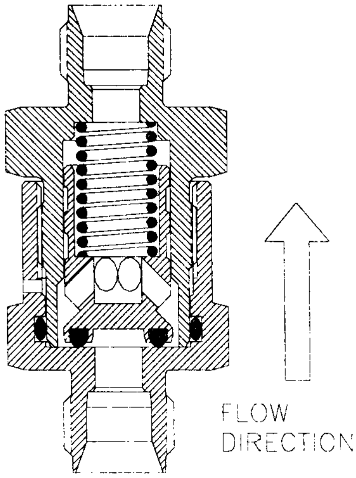

Abb. 8.2: Schnitt durch das Überströmventil der Firma Parker

Manipulationen vorzubeugen.
Die ausgewählten Ventile der Firma Parker (Abbildung 8.2) [PARKER 2] erfüllen die Forderung bezüglich der verwendeten Materialien. Wiederum wird die Anzahl unterschiedlicher Hersteller im gesamten Gassystem durch die Wahl dieses Herstellers minimiert.

8.2.4 Speicherprogrammierbare Steuerung der Gasmischung

Zur Realisierung der Steuerung der Gasmischanlage wurde auf den "kleineren Bruder" der für die Gasregelung ausgewählten S7-400 SPS zurückgegriffen. Zum Einsatz kommt die S7-200 der Firma Siemens (Abbildung 8.8) [SIEMENS 11], die bei günstigen Kosten eine für die Gasregelung angemessene Dimensionierung besitzt und ein einheitliches Datenerfassungskonzept der Regeleinheiten erlaubt. Die Kommunikation zwischen S7-400 und S7-200 wird über bereits in den CPU's integrierte Profibusverbindungen ermöglicht (siehe Kapitel 8.4.4). Die S7-200 [SIEMENS 11] mit der verwendeten CPU 215-2 DP verfügt über zwei RS-485 Schnittstellen, von denen eine für den Profibusanschluß genutzt wird. Maximal 7 Erweiterungsgeräte können zusätzlich zur CPU verwendet werden. Im Fall der Gasmischanlage verfügt die maximal erweiterte SPS über

- 26 digitale Ausgänge
- 14 digitale Eingänge
- 5 analoge Ausgänge
- 12 analoge Eingänge

Außerdem ermöglicht die verwendete CPU die Nutzung eines PID-Algorithmus.

8.2.5 Waagen

Um den Füllzustand der Dimethyletherflaschen für die Gasmischanlage feststellen zu können, werden Waagen benötigt. Der DME-Flaschendruck bleibt während der Benutzung konstant, da DME in flüssiger Form vorliegt. Das Wiegen ist somit der einzige Weg, den Füllstand zu beobachten. Da jeweils zwei DME-Flaschen zum unterbrechungsfreien Wechsel an der Station angeschlossen sind, benötigt man zwei Waagen, die folgenden Anforderungen genügen müssen:

- Sie müssen eine ex-geschützte Ausführung besitzen, da sie direkt im Flaschenbereitstellungsraum benötigt werden und dort elektrische Geräte aufgrund der DESY Sicherheitsbestimmungen [DESY] (explosionsgefährdete Räume, Zone 2)[2] nur in einer solchen Ausführung eingesetzt werden dürfen.

- Das Gewicht soll der SPS durch einen Stromausgang (4 - 20 mA) übermittelt werden. So wird es möglich, einen Defekt der Waagen an dem dann anliegenden 0 mA Signal frühzeitig zu erkennen. Auch die anderen Komponenten des Gassystems nutzen aus diesem Grund ein Stromsignal mit diesem Range für die Übermittlung ihrer Meßwerte.

- Die DME-Flaschen besitzen 50 kg Füllmenge. Zusammen mit dem Gewicht der Gasflasche selbst ergibt sich eine Gesamtmasse von etwa 70 kg. Eine Genauigkeit der Waagen von $\pm 50g$ ist ausreichend.

- Eine Auflagefläche von etwa 35 cm Durchmesser und ein maximaler Meßbereich bis 100 kg sollten zur Verfügung stehen.

8.3 Aufbau und die Inbetriebnahme der Gasmischanlage

8.3.1 Schematische Übersicht des Aufbaus

Abbildung 8.3 zeigt den schematischen Aufbau der Gasmischanlage mit den Meßstellen, die von der Steuerung ausgewertet werden.
In die Mischanlage führen die drei Gasversorgungsleitungen (Argon, DME und Stickstoff). Über in den Gasverlauf integrierte Schwebekörperflußmesser ist eine optische Kontrolle, über Pneumatikventile (NC) ein Schließen aller drei Gasleitungen möglich. Das Pneumatikventil PV10 (NC) ermöglicht es, das gesamte System mit Stickstoff zu spülen.
Im weiteren Verlauf sorgen sowohl in der Argon- als auch in der DME-Versorgungsleitung, die beide optional auch mit Stickstoff gespült werden können, Drucksensoren, Druckschalter und Überströmventile dafür, den Druck in der Leitung auf maximal 3 bar zu begrenzen.
Die beiden angesprochenen Versorgungsleitungen speisen zwei unabhängige Mischkreisläufe, in denen die erforderliche Mischung durch Massenflußregler hergestellt wird. Nur einer der Kreisläufe (MFC1 + MFC2 oder MFC3 + MFC4) ist in Betrieb. Der jeweils andere Kreislauf dient dazu, daß System bei einer Störung der Massenflußregler durch die anderen beiden Regler weiter betreiben zu können. Eine Beseitigung der Störung ist in diesem Fall möglich, ohne daß die Gasversorgung der Kammern unterbrochen werden muß. Jede einzelne Gasleitung dieser Mischkreisläufe kann durch Hand- und Pneumatikventile gesperrt und der Gasfluß durch Schwebekörperflußmesser überwacht werden.

[2]Die Zone 2 umfaßt Bereiche, in denen damit zu rechnen ist, daß gefährliche, explosionsfähige Atmosphäre nur selten und dann nur kurzzeitig auftritt. Die Norm VDE0165 enthält für die Errichtung elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen sicherheitstechnische Festlegungen im Sinne alle zutreffenden Verordnungen und Richtlinien.

Das gemischte Gas wird dem Faß zugeführt. Zuvor wird wiederum durch den Einsatz eines Überströmventils sichergestellt, daß der Druck in diesem Bereich der Mischanlage auf maximal 1,75 bar steigen kann. Sowohl im Faß als auch in der alternativ im Gasverlauf möglichen Bypassleitung[3] wird durch Drucksensoren der herrschende Druck erfaßt. Druckschalter an den gleichen Stellen erhöhen die Sicherheit im System.
Über ein weiteres Pneumatikventil PV6 (NC) und ein Handventil (HV8) gelangt das gemischte Gas über eine etwa 100 Meter lange Edelstahlleitung zum Verteiler auf dem Elektroniktrailer, nachdem vorher der Gesamtfluß durch einen Massenflußmesser erfaßt wurde.
Das Pneumatikventil PV5 (NO) ermöglicht einen Druckausgleich des Fasses im Störungsfall.
Die Systempumpe, die das Gas nach dem Durchgang durch die Nachweiskammern in den Mischraum zurückpumpt, befindet sich ebenfalls in der Gasmischanlage.
Zwei verschiedene Belüftungsleitungen im Mischsystem dienen dazu, das abgepumpte Gas bzw. das eventuell durch die Überströmventile abgegebene Gas in die Belüftungsleitung der Gashütte zu führen.

8.3.2 Funktionsweise

Regelung

In der Gasmischanlage wird der Druck im Mischfaß auf den Sollwert (voraussichtlich 300 - 500 mbar) geregelt. Die Druckerfassung geschieht durch eine SETRA-Absolutdruckdose (*Druck_Faß*). Ein Unterschied zu den bisher geschilderten Regelungen besteht in der Tatsache, daß in der Mischanlage ein in das Programm der SPS integrierter Software-PID-Regler eingesetzt wird. Dieser ermittelt aus der Differenz zwischen dem Soll- und dem Istdruck im Mischfaß den Sollfluß [= Sollwert(PID)].
Aus diesem Wert berechnen sich die Sollwerte für die beiden Massenflußregler in Abhängigkeit vom gewählten Mischungsverhältnis[4] auf folgende Weise:

Sollwert(DME)= $Sollwert(PID) * \frac{Mischungsverhältnis}{100}$

Sollwert(Ar) = $\frac{100-Mischungsverhältnis}{Mischungsverhältnis}$ $*$ Sollwert(PID) $*$ Kalibrationsfaktor

Die DME-Massenflußregler dienen somit als "Master-Regler", d.h. der PID-Algorithmus greift nur auf diese Flußregler direkt zu. Die Argon-Massenflußregler werden präzise entsprechend des Mischungsverhältnisses durch einfache SPS-Ansteuerungen nachgeführt.
Der Kalibrationsfaktor in der Berechnung des Argon-Sollwertes ergibt sich aus der Tatsache, daß die eingesetzten Massenflußregler auf den Durchfluß von DME geeicht wurden.

Anfahren

Ausgehend vom sicheren Zustand, der sich bei abgeschaltetem System automatisch einstellt, ist ein Start des Betriebes der Mischanlage nur möglich, wenn die SPS der Regelung (S7-400) und die LV-Versorgung der Mischanlage sich in einem störungsfreien Zustand befinden.
Das Anfahren des Systems findet in zwei Schritten statt:

[3]Durch die Bypassleitung besteht die Möglichkeit einer schnellen Inertisierung des gesamten Gassystems des ITR ohne das Mischfaß. Dabei müssen allerdings Nachteile bei der Regelung (größeres Schwingen) in Kauf genommen werden (siehe Kapitel 8.2.1).

[4]Das Mischungsverhältnis ist der Anteil von DME an der Mischung in %.

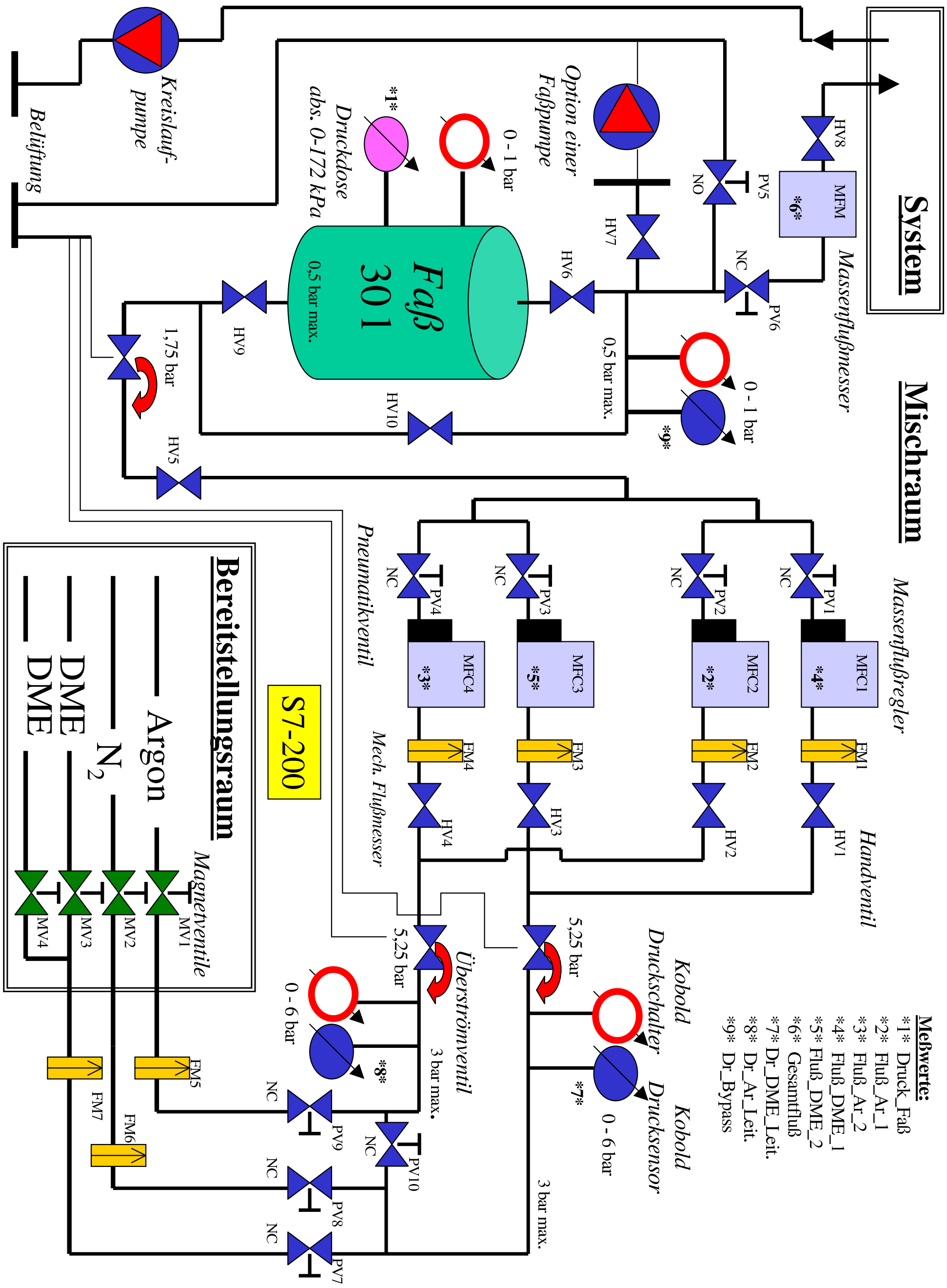

Abb. 8.3: Die Abbildung zeigt den schematischen Aufbau der Gasmischanlage.
Die in der Abbildung enthaltenen - in Sternsymbole eingefaßten - Ziffern symbolisieren die an der jeweiligen Stelle genommenen Meßwerte. Eine Zuordnung wird durch die ebenfalls in der Abbildung enthaltene Tabelle möglich.

1. Die Ar- und DME-Versorgungsleitungen werden geöffnet, die Systembelüftung (PV5) geschlossen und der Zugang zum Regelsystem (PV6) geöffnet. Alle Massenflußregler werden geschlossen und die Kreislaufpumpe des Gesamtsystems in Betrieb gesetzt.

2. Nach einem Zeitraum von 2 Minuten werden anschließend die Ventile des ersten Kreis-

laufes (MFC1 und MFC2) der Mischanlage geöffnet und die PID-Regelung gestartet. Der zweite Kreislauf (MFC3 und MFC4) bleibt geschlossen und wird nur im Fall einer Störung im ersten Kreislauf geöffnet (siehe unten).

Betrieb

Während des Betriebes erfüllt die SPS vor allem drei Aufgaben:

- **Durchführung der angesprochenen PID-Regelung**
- **Überwachung** aller im Kapitel 8.3.3 dargestellten Meßwerte.
  Im Fall einer Störung der MFC-Funktionen in einem der Kreisläufe der Mischanlage (Abweichung des Soll- vom Istwert eines Massenflußreglers über die Toleranzgrenzen hinweg) wird automatisch auf den zweiten Kreislauf umgestellt. Erst wenn auch hier eine Störung auftritt und der andere Kreislauf noch nicht wieder einsatzbereit ist, schaltet das System die Anlage in den Störungszustand.
  Jede andere Störung im System führt sofort zu einem Wechsel in den sicheren Zustand.
- **Steuerung der Signallampen**, die den Zustand des Systems am Anzeigedisplay darstellen.
- **Ansteuerung der Displays**, die die Meßwerte des Systems ständig an der Frontplatte des Racks darstellen (Abbildung 8.4).

Stickstoffspülung

Die Stickstoffspülung des Gesamtsystems (inklusive der Regeleinheiten und der Kammern) kann durch Betätigung des Schlüsselschalters aktiviert werden. Voraussetzung ist dabei, daß das System sich in einem störungsfreien Zustand befindet. Eine Abschaltung ist nicht nötig. Es werden die Ar- und DME-Versorgungsventile (PV7 und PV9) geschlossen und der Stickstoff sowohl durch den Ar- als auch durch den DME-Zweig geleitet (öffnen von PV8 und PV10). 10 min wird nun zuerst mit dem ersten Kreislauf der Mischanlage (MFC1 und MFC2) die Regelung durchgeführt. Anschließend wird der zweite Kreislauf (MFC3 und MFC4) genutzt, um das System zu spülen.
Der Stickstoffspülmodus wird durch erneute Betätigung des Schlüsselschalter wieder beendet.

Faßspülung

Über das Textdisplay (siehe unten) kann der Faßspülmodus aktiviert werden, vorausgesetzt, das System befindet sich nicht im Betriebszustand, d.h. es findet keine Regelung statt.
Alle Massenflußregler werden dann auf den halben Range geöffnet, der PID-Regelalgorithmus gestoppt und der Zugang zum Experiment (PV6) geschlossen. Das Gas (Ar/DME) entweicht über die geöffnete Belüftung (PV5).
Beendet wird die Spülung ebenfalls durch Eingabe in das Textdisplay.

Textdisplay

Das Textdisplay (TD 200) [SIEMENS 12], das im Anzeigedisplay der Mischstation (Abbildung 8.4) untergebracht ist, ermöglicht eine Änderung des Mischungsverhältnisses von Argon und DME ohne durch eine Programmänderung in den Ablauf einzugreifen. Durch die Eingabe (über die Tastatur des Textdisplays) des gewünschten prozentualen Anteils von DME an der Mischung in das Display wird lediglich eine Variable des laufenden Programms geändert. Dies ist möglich, ohne das System zu stoppen. Die Änderung des Parameters ist durch einen Zahlencode gegen unberechtigte Zugriffe gesichert.

Störungen

Im Fall eine Störung im System schaltet die SPS in den sicheren Zustand, d.h. alle Pneumatikventile bis auf das Belüftungsventil PV5 wechseln in den "normally"-Zustand, die PID-Regelung wird gestoppt und alle Massenflußregler werden geschlossen. Handelt es sich bei der Störung um einen Druckalarm (mindestens ein Sensor mißt kritische Werte), wird zusätzlich der Druckausgleich aktiviert (PV5 öffnet).
Das Auftreten der Störung wird durch das Auslösen einer Signalhupe signalisiert. Über den Profibus (Kapitel 8.4.4) wird eine Störungsmeldung an die S7-400 der Gasregelung und damit auch an die Slow-Control des Experimentes abgesetzt.

Anzeigedisplay

Das in Abbildung 8.4 dargestellte Display ermöglicht die Anzeige alle relevanten Meßwerte des Gasmischsystems. Über die zwei Schlüsselschalter ist es möglich, die Stickstoffspülung des Systems zu starten und einen Master-Reset durchzuführen. Ein dritter Schlüsselschalter ist als weitere Option in das Display integriert. Schließlich ermöglichen Leuchtdioden, alle Ventilstellungen des Systems und zusätzliche Statusmeldungen optisch darzustellen.

8.3.3 Sicherheitsaspekte des Aufbaus

- bezüglich der Sicherheit des Gesamtsystems gegen eine Zerstörung der Kammern

  Um Beschädigungen der Nachweiskammern infolge einer Störung der Gasmischanlage[5] möglichst ausschließen zu können, wurde auf die bekannten Sicherheitskomponenten (siehe Kapitel 4.2.2) zurückgegriffen:

  - **Pneumatikventile**
    Drucklos bzw. stromlos sind die Pneumatikventile im Bereich der Mischanlage wiederum so geschaltet, daß sich das System in einem sicheren Zustand befindet, d.h. alle Ventile bis auf das Belüftungsventil PV5 sind geschlossen. Kritsche Drücke können sich so ohne Gefahr für die Kammern abbauen. Weiteres Gas kann nicht nachströmen.
    Folgende Zustände führen dazu, daß sich die SPS "selbständig" in diesen sicheren Zustand schaltet:

    * Störungen der SPS
    * Gemessene Störungen im System:
      · Überschreiten der Toleranzgrenzen der durch die SPS überwachten Werte
      · Druckalarmmeldung der Druckschalter
      · Ausfall der Stickstoffinertisierung des Innenraumes der Mischanlage
    * Ausfall der Druckluft
    * Feuer- oder Gasalarme

[5] Im schlimmsten Fall könnte eine Fehlfunktion der Flaschenstationen dazu führen, daß plötzlich 5 bar auf den Leitungen liegen würde.

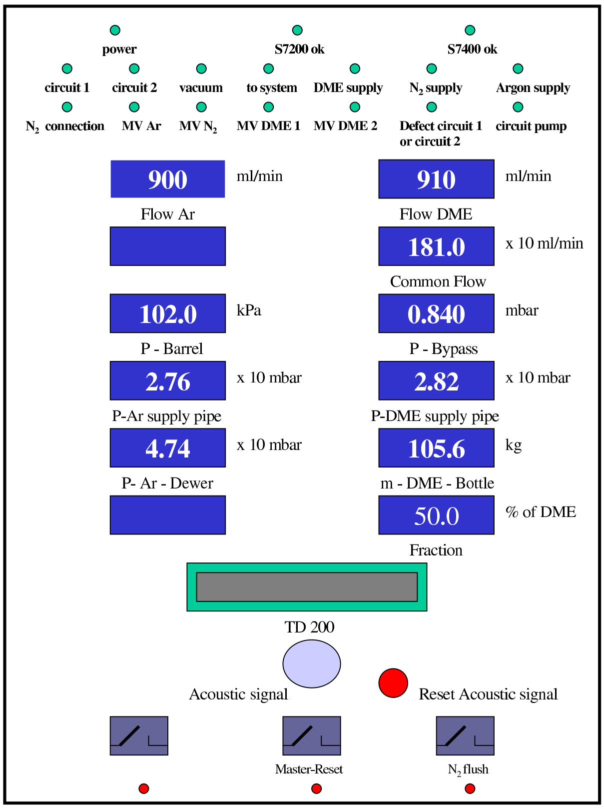

Abb. 8.4: Das Anzeigedisplay der Gasmischanlage

∗ Betätigung des NOT-Aus Schalters in der Gashütte oder im Mischrack selbst

Ist das System nicht in Betrieb, befindet es sich ebenfalls in diesem Zustand.

Die Pneumatikventile im Mischrack weisen aufgrund der kurzen Schlauchlängen Schaltzeiten im Bereich unter einer Sekunde auf, so daß sehr schnell auf Störungen reagiert werden kann.

– **Drucksensoren**
  Zum Einsatz kommen drei Drucksensoren und eine Absolutdruckdose. Die programmierten Toleranzgrenzen sind im Unterkapitel "SPS" aufgeführt.

– **Druckschalter**
  Vier Druckschalter steigern die Sicherheit des Systems. Die eingestellten Auslösegrenzen sind die folgenden[6]:

Druckschalter in der Ar-Versorgungsleitung:	$\leq$ 3 bar
Druckschalter in der DME-Versorgungsleitung:	$\leq$ 3 bar
Druckschalter in der Bypassleitung:	$\leq$ 0,5 bar
Druckschalter in der Faßdruckmessung:	$\leq$ 0,5 bar

[6] Aufgeführt sind die Bereiche, die tolerabel für den Betrieb der Mischanlage sind.

- **SPS**
  Die von der SPS überwachten Meßwerte und die eingestellten Grenzen für die selbständige Schaltung in den sicheren Zustand sind die folgenden (die Meßpunkte sind der Abbildung 8.3 zu entnehmen):

Fluß_Ar_1:	Sollwert $\leq 1,8 \frac{l}{min}$	(Massenflußregler)
Fluß_Ar_2:	Sollwert $\leq 1,8 \frac{l}{min}$	(Massenflußregler)
Fluß_DME_1:	Sollwert $\leq 1,8 \frac{l}{min}$	(Massenflußregler)
Fluß_DME_2:	Sollwert $\leq 1,8 \frac{l}{min}$	(Massenflußregler)
Druck_Ar_Leit.:	Sollwert $\leq$ 3 bar	(Drucksensor)
Druck_DME_Leit.:	Sollwert $\leq$ 3 bar	(Drucksensor)
Druck_Bypass:	Sollwert $\leq$ 0,5 bar	(Drucksensor)
Druck_Faß:	Sollwert $\leq$ 0,5 bar	(Absolut-Druckdose)
Gesamtfluß:	Sollwert $\leq 3,6 \frac{l}{min}$	(Massenflußmesser)

  Die Sollwertgrenzen der Massenflußregler und des Massenflußmessers entsprechen 200% des Nominalwertes:

$$10 \ \frac{ml}{min} \text{ mal 184 Kammern} = 1{,}8 \ \frac{l}{min} \text{ Gesamt-Gasmenge}$$
$$= 0{,}9 \ \frac{l}{min} \text{ DME} + 0{,}9 \ \frac{l}{min} \text{ Ar (= Nominalwert)}$$

  Des weiteren werden folgende berechnete Größen überwacht:

Abweichungstoleranz DME-Massenflußregler (Soll-Ist):	±10 ml
Abweichungstoleranz Ar-Massenflußregler (Soll-Ist):	±10 ml
Abweichungstoleranz Gesamt-Massenflußmesser (Erwartet-Ist):	±10 ml

  Die typische Zykluszeit der SPS liegt im Bereich von 10 msec. Innerhalb dieses Zeitraumes werden alle angesprochenen Werte einmal überprüft.

- bezüglich der Anforderungen des Betriebes dieser Anlage bei DESY

  Neben den in Kapitel 2.4 genannten Forderungen für den Betrieb mit brennbaren Gasen müssen im Gasmischraum in der HERA-B Gashütte weitere Forderungen erfüllt werden [REINSCH]. Die wichtigsten Punkte sind dabei:

  - Die Gehäuse der Anlagen in der Gashütte, die brennbare Gase führen, sollen, wegen der nicht ex-geschützten Regel- und Ausleseeinheiten[7], zur **Inertisierung ständig mit Stickstoff gespült** werden.
  - Die **Stickstoffspülung** des Innenraumes muß überwacht werden. Zu diesem Zweck werden **Schwebekörperflußmesser** mit einem unteren Begrenzungssignal eingesetzt.
  - **Alle Schraubverbindungen** der Gasleitungen dürfen sich nur **in den Gasgehäusen befinden**.

  Die Gasmischanlage des ITR realisiert alle sicherheitstechnischen Anforderungen.
  Der in Abbildung 8.5 dargestellte Aufbau des Gasmischracks stellt die Trennung des

[7]Massenflußregler sind am Markt in der erforderlichen Bauform nicht erhältlich. Ex-geschützte Drucksensoren kosten mindestens doppelt so viel wie das eingesetzte Produkt und nehmen zudem wesentlich mehr Platz ein.

gasführenden und des Elektronikbereichs in der Mischanlage dar. Der untere Bereich wird durch eine ständige Stickstoffspülung, die mittels eines Schwebekörperflußmessers nach unten begrenzt wird, dauerhaft inertisiert.

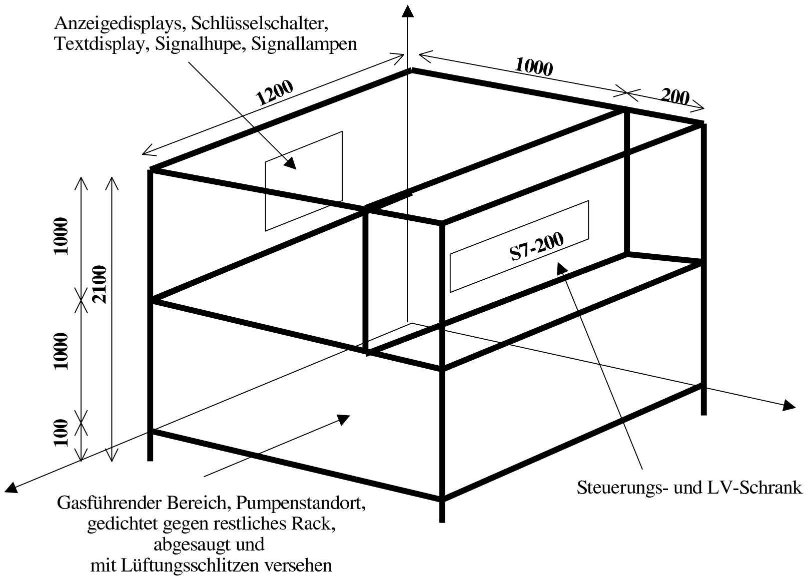

Abb. 8.5: Aufbau des Mischracks (Zeichnung: H.-B. Dreis). Die enthaltenen Abmessungen sind Angaben in Millimeter.

8.3.4 Die aufgebaute Gasmischanlage

Die Abbildungen 8.6, 8.7 und 8.8 zeigen Fotos der aufgebauten Gasmischanlage.

Abbildung 8.6 gibt einen Eindruck der Vorderseite des Mischracks.
Im oberen Bereich (Elektronikbereich) ist das Anzeigedisplay (siehe Abbildung 8.4) zu erkennen. Hier können alle wichtigen Meßwerte des Systems sofort abgelesen werden und über die Schlüsselschalter bzw. das Textdisplay Änderungen von Parametern der automatisierten Steuerung durchgeführt werden.
Im unteren Bereich (gasführende Komponenten) erkennt man hinter einer Plexiglasscheibe die Schwebekörperflußmesser des Systems. Zusätzlich zeigt die Fotografie alle Handventile.

Einen Eindruck der Gasverrohrung in der Mischanlage selbst vermittelt das Foto in Abbildung 8.7. Man erkennt im Vordergrund das Mischfaß. Außerdem wird der Druckminderer der Stickstoffspülung und der geforderte Schwebekörperflußmesser zur unteren Begrenzung der Inertisierung deutlich.

Den hinteren, oberen Bereich des Racks zeigt die Abbildung 8.8. Dieser Steuerungsschrank ist aus Sicherheitsgründen (Gasabdichtung, Griffschutz) durch eine Plexiglastür abgeschlossen. Der Bereich enthält als wichtigste Komponenten die SPS der Gasmischung, sämtliche Spannungsversorgungen, den Not-Aus Schalter und die Ansteuerung der Pneumatikventile.

Abb. 8.6: Das Foto zeigt die Vorderseite des Gasmischracks. Deutlich wird die horizontale Zweiteilung. Im oberen Bereich ist das Anzeigedisplay zu erkennen. Außerdem sieht man die Handventile und Schwebekörperflußmesser.

Abb. 8.7: Das Foto gibt einen Eindruck der Gasverrohrung des Mischracks.
Im Vordergrung ist deutlich das Mischfaß zu erkennen.

8.4 Steuerungstechnik und Software

8.4.1 Aufbau der S7-200

Die Abbildung 8.9 zeigt den schematischen Aufbau der Steuerung der Gasmischanlage. Neben der profibusfähigen CPU kommen sieben Erweiterungsgeräte (analog und digital) zum Einsatz (maximale mögliche Anzahl).

8.4.2 Programmierung der S7-200

Im Unterschied zur Programmierung der S7-400 (Kapitel 5.1.2) stehen für die S7-200 der Gasmischung nur die beiden Programmiereditoren Kontaktplan und Anweisungsliste zur Verfügung.

8.4.3 Schematikblöcke

Das Flußdiagramm in Abbildung 8.10 stellt den Programmablauf in der S7-200 dar. Das Programm gliedert sich in 4 Blöcke, deren Inhalt bereits in Kapitel 8.3.2 angesprochen wurde:

- **Anfangseinstellungen**

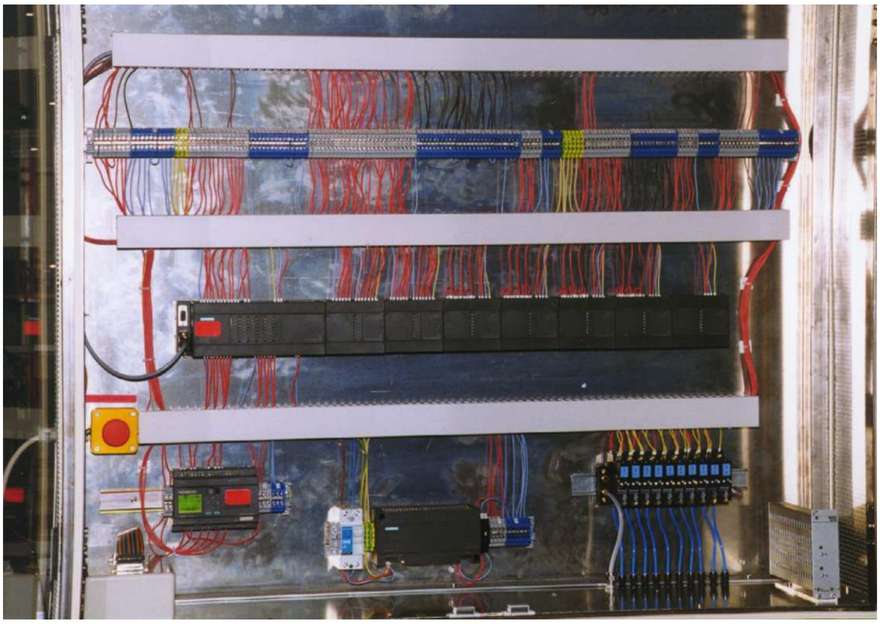

Abb. 8.8: Der hintere Bereich des Gasmischracks enthält den Elektronikschaltschrank. Das Kernstück bildet hier die Speicherprogrammierbare Steuerung der Gasmischanlage (S7-200). Sie ist in der Mitte des Fotos als langes schwarzes Bauelement zu erkennen.

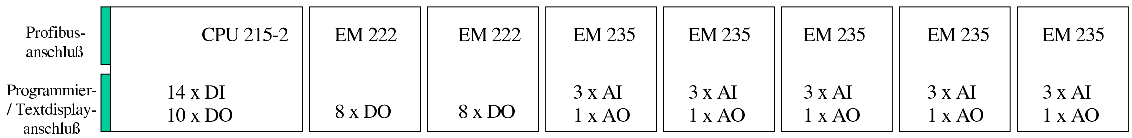

Abb. 8.9: Der schematische Aufbau der S7-200. Folgende Abkürzungen werden verwendetet:
DI = Digital-In, D0 = Digital-Out, AI = Analog- In, AO = Analog -Out

- **Anfahren**
- **Betriebszustand**
- **Störungszustand**

Ein Verlassen des Programmablaufes durch Stoppen der SPS ist jederzeit möglich. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden in das Flußdiagramm aber nur zwei Stop-Abfragen aufgenommen.
Ebenfalls aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde darauf verzichtet, die weiterlaufende zyklische Programmabarbeitung des Betriebszustandes während des Stickstoff- und Faßspülmodus darzustellen. Beide Zustände werden vom Benutzer durch den Schlüsselschalter bzw. durch Eingabe in das Textdisplay beendet.

Das ablauffähige Programm ist in Anhang B dargestellt.

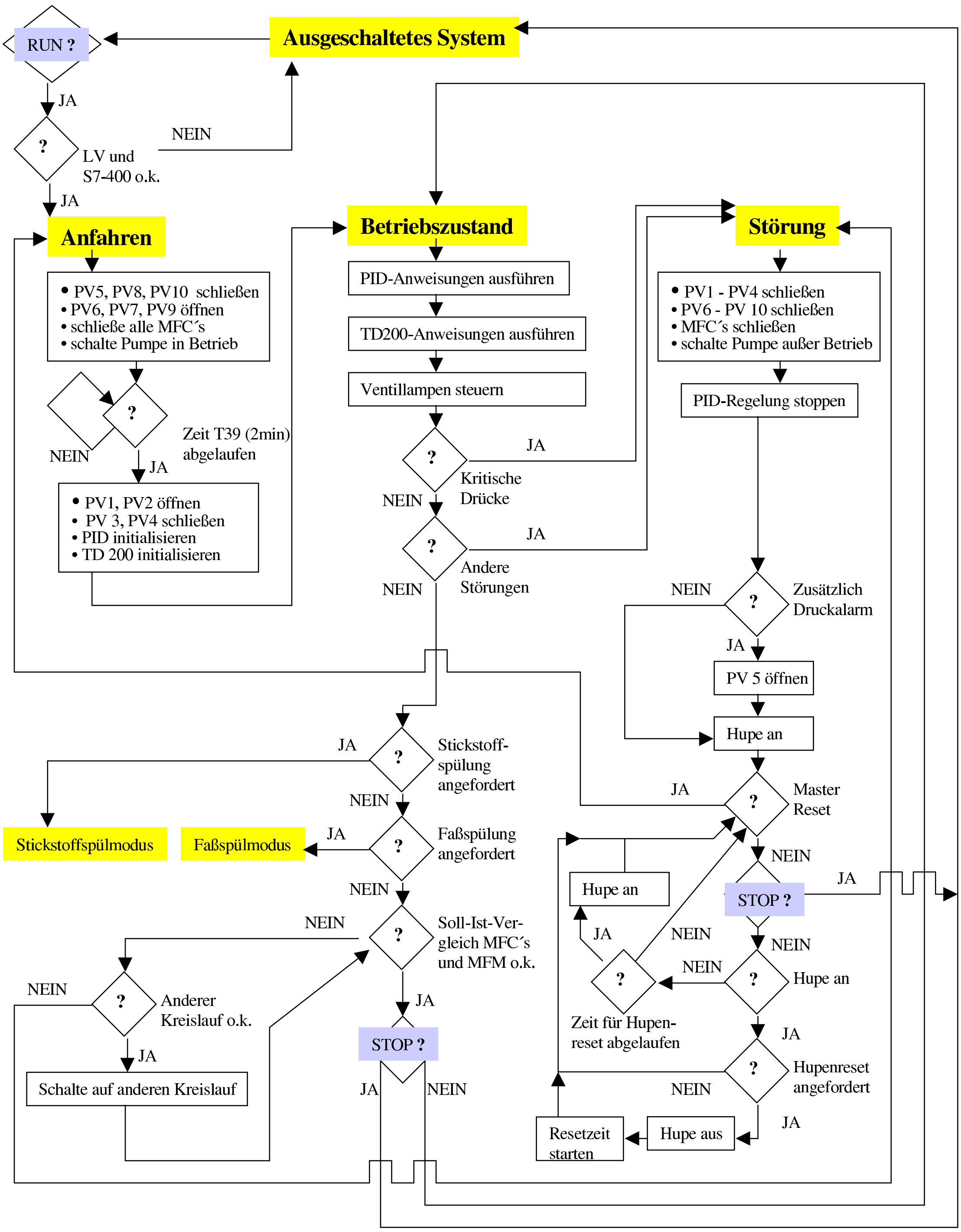

Abb. 8.10: Flußdiagramm des Programmablaufs in der S7-200

8.4.4 Busverbindungen

Die CPU der S7-200 ist profibusfähig und übermittelt der S7-400 der Gasregelung über dieses Bussystem (siehe Kapitel 5.3.2) ein vollständiges Zustandsprotokoll. So werden auch die Daten der Gasmischanlage in den Datenstrom eingefügt, der aus der S7-400 ausgelesen und der Slow-Control übermittelt wird.
Die S7-400 kann so außerdem Zustände der S7-200 intern, d.h. ohne Verwendung von weiteren Peripheriebaugruppen auswerten.

8.5 Test der Mischanlage

Aufgrund einzelner fehlender bzw. verspätet gelieferter Komponenten konnte ein vollständiger Funktionstest der Mischanlage im Rahmen dieser Arbeit noch nicht durchgeführt werden.

Bisherige Tests bezogen sich auf die Funktion einzelner Komponenten und eine fehlerfreie Kompilierung des Steuerungsprogramms. Einzelne Programmteile konnten zusätzlich schon an Komponenten der Anlage getestet werden.
Ein späterer Funktionstest umfaßt zusätzlich folgende Punkte:

- Die Herstellung einer Mischprobe und deren anschließende gaschromatographische Untersuchung erlaubt eine Aussage über die Güte der Mischung.
- Wie schon für das Prototypsystem der Gasregelung sollen mögliche Störfälle in der Mischanlage "künstlich" erzeugt und das Verhalten des Systems untersucht werden.

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

Die Messung der $\mathcal{CP}$-Verletzung im B-System ist das Ziel des HERA-B Experimentes am Deutschen Elektronensynchrotron (DESY) in Hamburg. Das Physikalische Institut der Universität Heidelberg arbeitet an der Erstellung des inneren Spurkammersystems des HERA-B Detektors. Die Teilchennachweiskammern dieses Subdetektors sind Gas Mikrostreifen Kammern (GEM-MSGC), in denen die nachzuweisenden Teilchen durch ihre Ionisationswirkung im Gas detektiert werden.
Der Aufbau eines automatisierten Gasversorgungssystems für diese Spurkammern war das Ziel der vorliegenden Arbeit.

Das Gasversorgungssystem besteht aus 16 Gasregelungen, die die Aufgabe haben, den Druck in den Kammern zu regulieren. Bauartbedingt ist es dabei notwendig, den Kammerdruck möglichst nahe am Atmosphärendruck mit Schwankungen im Bereich einiger μbar zu halten und gleichzeitig einen für den Nachweis notwendigen Gasfluß von bis zu 20 $\frac{ml}{min}$ durch jede Kammer sicherzustellen. Zusätzlich beinhaltet das System eine Gasmischanlage, die die für den Betrieb erforderliche Mischung des Gases [50% Argon, 50% Dimethylether (DME)] gewährleistet.

Zunächst bestand die Aufgabe darin, in Laborexperimenten geeignete Hardwarekomponenten zur Realisierung der beiden automatisierten Systeme unter den speziellen Anforderungen bei HERA-B zu finden.
Zu beachten sind die 110 Meter langen Gasleitungen mit Volumina von 6 Litern zwischen den einzelnen Komponenten des Systems (Regelstrecke mit Totzeit), die Höhenunterschiede von etwa 3,5 Metern, das relativ kleine Regelvolumen (300 ml pro Kammer) und die erforderliche Funktionsfähigkeit einzelner Komponenten im Magnetfeld des Detektors (0,8 Tesla).
Sehr restriktive Anforderungen bestehen an die in den Komponenten verwendeten Materialien. Viele Materialien konnten nicht verwendet werden, da sie durch das in der Gasmischung enthaltene DME angegriffen werden. Dies hätte zu Ablagerungen in den Nachweiskammern geführt. Die Funktionsfähigkeit der Kammern wäre dann unter Umständen in kürzester Zeit nicht mehr gewährleistet gewesen.

Die ausgewählte Hardware wurde genutzt, um einen Regelkreis für die 1998 in den HERA-B Detektor eingebauten 8 Nachweiskammern aufzubauen.
Nachdem die Voruntersuchungen abgeschlossen waren, wurden folgende Aufgaben im Rahmen dieser Arbeit abgeschlossen:

- Aufbau und Inbetriebnahme des Regelkreises
- Einbindung des Systems in die DESY-Infrastruktur (Gassensoren, Alarme, Sicherheitsabschaltungen)
- Programmierung der zur Regelung gehörenden Speicherprogrammierbaren Steuerung. Diese hat vor allem die Aufgabe, die unterschiedlichen Meßwerte, die im System genommen werden, auszuwerten und eventuelle, für die Sicherheit der Nachweiskammern kritische Werte zu erkennen und in diesem Fall selbständig einen sicheren Zustand herbeizuführen.

Messungen konnten belegen, daß die Schwankungen des Druckes in den Kammern im Bereich von $\pm$ 4 μbar um den Atmosphärendruck liegen, daß das System auf Schwankungen im herrschenden Umgebungsdruck sofort reagiert und daß mögliche Störungen ebenfalls sofort registriert werden. Die Sicherheit der Nachweiskammern ist jederzeit gewährleistet.
Weiterhin konnte am Prototypsystem nachgewiesen werden, daß eine Steigerung des Flusses auf bis zu 60 $\frac{ml}{min}$ durch jede Kammer möglich ist. Es bestehen somit große Reserven, falls es sich als sinnvoll erweisen würde, den Gasfluß gegenüber den bisher angestrebten Sollwerten zu steigern, um zum Beispiel Ablagerungen durch das Gassystem in den Nachweiskammern zu vermeiden.

Aufgrund der positiven Ergebnisse des Jahres 1998 wurde das Konzept des 98iger Gassystems mit nur geringen Veränderungen für 1999 (16 Kreisläufe, d.h. 184 Kammern) übernommen. Für das Jahr 1999 muß noch die Programmierung der für den Datenaustausch notwendigen Bussysteme durchgeführt werden.

Das 1998 installierte System enthielt noch keine Gasmischanlage. Die Versorgung der Kammern wurde durch vorgemischte Flaschen sichergestellt.
Für das endgültige System des Jahres 1999 wurden zeitgleich im Rahmen dieser Arbeit folgende Aufgaben erfüllt:

- Aufbau einer automatisierten Mischanlage
- Programmierung der Steuerung des Mischsystems

Im Sommer des Jahres 1999 werden zunächst 60 Kammern des inneren Spurkammersystems in den HERA-B Detektor installiert. Bezüglich des Gassystems sind dabei keine Schwierigkeiten zu erwarten.

Anhang A

Programm der Gasregelung

Dieser Anhang enthält das auf der S7-400 ablaufende Programm als Quellcode. Dieser Code umfaßt alle Organisations-, Daten- und Funktionsbausteine, aus denen das ablauffähige Programm zusammengesetzt ist. Im wesentlichen gliedert sich der Quellcode in drei Teile:

- **Datenübertragung**: Die SPS wird in diesem Teil angewiesen, bestimmte Werte über die serielle Schnittstelle des Kommunikationsprozessors zu senden (Seite 1-10 des dargestellten Quellcodes).

- **zyklischer Programmablauf**: Die Programmteile ("ORGANIZATION_BLOCK OB1"), die das Anfahren, den Betriebszustand und das Verhalten bei auftretenden Störungen beschreiben, sind in diesem Teil dargestellt (Seite 11-26).

- **Anfangseinstellungen**: Die Anfangseinstellungen werden im "ORGANIZATION_BLOCK OB100" dargestellt (Seite 26-27). Zusätzlich wird hier die Initialisierung des zyklischen Programmablaufes und der Datennahme durchgeführt.

Um die im Quellcode verwendeten symbolischen Adressen den logischen Adressen der SPS zuordnen zu können, ist im folgenden eine Symboltabelle aufgeführt:

Symbol	Adresse	Datentyp	Kommentar
PNs_Kammer	A 0.0	BOOL	-
Lampe_Störung	A 0.1	BOOL	-
PID_Relais	A 0.3	BOOL	-
Pum_Relais	A 0.4	BOOL	-
PNs_MFC	A 0.5	BOOL	-
Gas-ok.	A 1.6	BOOL	Meldung an Kontrolle
Signalhupe	A 1.7	BOOL	-
proc_data	DB 97	DB 97	Process Data
print_db_data	DB 98	DB 98	Speichert realen Datenstring
print_db	DB 99	DB 99	Speichert print string Anfangswert
LV_ok.	E 8.0	BOOL	-
S7200_ok	E 8.1	BOOL	-
PID_Alarm1	E 8.2	BOOL	-
PID_Alarm2	E 8.3	BOOL	-
DruckSch_Einlaß	E 8.4	BOOL	-
DruckSch_Auslaß	E 8.5	BOOL	-
Reset-Schalter	E 8.7	BOOL	-
Einlaßdruck	EW 100	WORD	Range: 4-20 mA *D* 2DMU
Pumpenvordruck	EW 102	WORD	Range: 4-20 mA *D* 2DMU
Auslaßdruck_minus	EW 104	WORD	Range: 4-20 mA *D* 2DMU
Einlaßfluß	EW 112	WORD	Range: 4-20 mA *C* 4DMU
Kammerdruck	EW 116	WORD	Range: +/- 5 V *A*
Kammerreferenzdruck	EW 118	WORD	Range: +/- 5 V *A*
Kammereinlaßdruck	EW 120	WORD	Range: +/- 1 V *A*
Kammerauslaßdruck	EW 122	WORD	Range: +/- 1 V *A*
Störung	M 5.0	BOOL	-
Einlaßdruck***	MD 48	REAL	Einheit: mbar
Pumpenvordruck***	MD 52	REAL	Einheit: mbar
Auslaßdruck_minus***	MD 56	REAL	Einheit: mbar
Einlaßfluß***	MD 60	REAL	Einheit: ml/min
Kammerdruck***	MD 68	REAL	Einheit: mycrobar
Kammerreferenzdruck***	MD 72	REAL	Einheit: mycrobar
Kammereinlaßdruck***	MD 76	REAL	Einheit: mbar
Kammerauslaßdruck***	MD 80	REAL	Einheit: mbar
Kammer(E/A)druck_delta	MD 176	DWORD	Forderung: $\leq$ 450
Einlaßdruck-kontrolle	MW 150	WORD	Forderung: $\geq$ 3500
Pumpenvordruck-kontr.	MW 152	WORD	Forderung: $\leq$ 20000
Auslaßdruck_minus-kont.	MW 154	WORD	Forderung: $\leq$ 20000
Einlaßfluß-kontrolle	MW 156	WORD	Forderung: $\leq$ 6000
Kammereindruck-kontr.	MW 158	WORD	Forderung: $\leq$ 1000
Kammerausdr.-kontrolle	MW 160	WORD	Forderung: $\geq$ -1000
Ausgangsdruck_delta	MW 162	WORD	Forderung: $\leq$ 300
Kammerdruck-kontrolle	MW 164	WORD	Forderung: $0 \leq p \leq 16600$
PRINT	SFB 16	SFB 16	Send Data to Printer
STATUS	SFB 22	SFB 22	Query the Status of a Remote Partner
Timer-Kammerbelüftung	T 1	TIMER	-
DELAY	T 2	TIMER	-
Timer-Pumpenvorlauf	T 3	TIMER	-
Resetdelay	T 4	TIMER	-

```
DATA_BLOCK DB 16
TITLE =
VERSION : 0.0

"PRINT"
BEGIN
   REQ := FALSE;
   ID := W#16#0;
   DONE := FALSE;
   ERROR := FALSE;
   STATUS := W#16#0;
   PRN_NR := B#16#0;
   INDEX := W#16#0;
END_DATA_BLOCK

DATA_BLOCK DB 22
TITLE =
VERSION : 0.0

"STATUS"
BEGIN
   REQ := FALSE;
   ID := W#16#0;
   NDR := FALSE;
   ERROR := FALSE;
   STATUS := W#16#0;
   INDEX := W#16#0;
END_DATA_BLOCK

DATA_BLOCK "proc_data"
TITLE =
VERSION : 0.0


  STRUCT
   tab : STRING  [3 ] := 'B'; // Tab-Ersatz
   fin : STRING  [254 ] := 'a';     // Final-String
   val1 : STRING  [254 ] := 'a';    // 1. Dateneintrag
   val2 : STRING  [254 ] := 'a';    // 2. Dateneintrag
   val3 : STRING  [254 ] := 'a';    // 3. Dateneintrag
   val4 : STRING  [254 ] := 'a';    // 4. Dateneintrag
   md48 : STRING  [16 ] := 'a';     // MD48 als String
   md52 : STRING  [16 ] := 'a';     // MD52 als String
   md56 : STRING  [16 ] := 'a';     // MD56 als String
   md60 : STRING  [16 ] := 'a';     // MD60 als String
   md68 : STRING  [16 ] := 'a';     // MD68 als String
   md72 : STRING  [16 ] := 'a';     // MD72 als String
   md76 : STRING  [16 ] := 'a';     // MD76 als String
   md80 : STRING  [16 ] := 'a';     // MD80 als String
   md176 : STRING  [16 ] := 'a';    // MD176 als String
   mw150 : STRING  [10 ] := 'a';    // MW150 als String
   mw152 : STRING  [10 ] := 'a';    // MW152 als String
   mw154 : STRING  [10 ] := 'a';    // MW154 als String
   mw156 : STRING  [10 ] := 'a';    // MW156 als String
   mw158 : STRING  [10 ] := 'a';    // MW158 als String
   mw160 : STRING  [10 ] := 'a';    // MW160 als String
   mw162 : STRING  [10 ] := 'a';    // MW162 als String
   mw164 : STRING  [10 ] := 'a';    // MW164 als String
  END_STRUCT ;
BEGIN
   tab := 'B';
   fin := 'a';
   val1 := 'a';
   val2 := 'a';
   val3 := 'a';
   val4 := 'a';
   md48 := 'a';
```



```
   md52 := 'a';
   md56 := 'a';
   md60 := 'a';
   md68 := 'a';
   md72 := 'a';
   md76 := 'a';
   md80 := 'a';
   md176 := 'a';
   mw150 := 'a';
   mw152 := 'a';
   mw154 := 'a';
   mw156 := 'a';
   mw158 := 'a';
   mw160 := 'a';
   mw162 := 'a';
   mw164 := 'a';
END_DATA_BLOCK

DATA_BLOCK "print_db_data"
TITLE =
VERSION : 0.0


  STRUCT
   carsten : STRING  [254 ] := 'a'; //Daten zum Uebertragen
  END_STRUCT ;
BEGIN
   carsten := 'Daten: ';
END_DATA_BLOCK

DATA_BLOCK "print_db"
TITLE =
VERSION : 0.0


  STRUCT
   Anna : STRING  [254 ] := '%S';   //Anfangswert
  END_STRUCT ;
BEGIN
   Anna := '%S';
END_DATA_BLOCK

FUNCTION_BLOCK FB 50
TITLE =
VERSION : 0.0

BEGIN
NETWORK
TITLE =
// Store process value (floating-point format) in appropriate DB
//
//  String mit Daten fuellen
//
// verfrachte folgende Daten in einen String
// T1,T2,T3,T4
// MD48,MD52,MD56,MD60,MD68,MD72,MD76,MD80,MD176
// MW150,MW152MW154,MW156,MW158,MW160,MW162,MW164
//

      CALL FC    30 (
           IN                       := "Einlaßdruck***",
           RET_VAL                  := "proc_data".md48);
      CALL FC    30 (
           IN                       := "Pumpenvordruck***",
           RET_VAL                  := "proc_data".md52);
      CALL FC    30 (
           IN                       := "Auslaßdruck_minus***",
```

```
        RET_VAL                    := "proc_data".md56);
    CALL FC    30 (
        IN                         := "Einlaßfluß***",
        RET_VAL                    := "proc_data".md60);
    CALL FC    30 (
        IN                         := "Kammerdruck***",
        RET_VAL                    := "proc_data".md68);
    CALL FC    30 (
        IN                         := "Kammerreferenzdruck***",
        RET_VAL                    := "proc_data".md72);
    CALL FC    30 (
        IN                         := "Kammereinlaßdruck***",
        RET_VAL                    := "proc_data".md76);
    CALL FC    30 (
        IN                         := "Kammerauslaßdruck***",
        RET_VAL                    := "proc_data".md80);
    CALL FC     5 (
        I                          := "Kammer(E/A)druck_delta",
        RET_VAL                    := "proc_data".md176);
    CALL FC    16 (
        I                          := "Einlaßdruck-kontrolle",
        RET_VAL                    := "proc_data".mw150);
    CALL FC    16 (
        I                          := "Pumpenvordruck-kontr.",
        RET_VAL                    := "proc_data".mw152);
    CALL FC    16 (
        I                          := "Auslassdruck_minus-kont.",
        RET_VAL                    := "proc_data".mw154);
    CALL FC    16 (
        I                          := "Einlaßfluß-kontrolle",
        RET_VAL                    := "proc_data".mw156);
    CALL FC    16 (
        I                          := "Kammereindruck-kontr.",
        RET_VAL                    := "proc_data".mw158);
    CALL FC    16 (
        I                          := "Kammerausdr.-kontrolle",
        RET_VAL                    := "proc_data".mw160);
    CALL FC    16 (
        I                          := "Ausgangsdruck_delta",
        RET_VAL                    := "proc_data".mw162);
    CALL FC    16 (
        I                          := "Kammerdruck-kontrolle",
        RET_VAL                    := "proc_data".mw164);
//
//
//

    CALL FC     4 (
        IN                         := "print_db_data".carsten,
        L                          := 300,
        P                          := 1,
        RET_VAL                    := "print_db_data".carsten);

    CALL FC     4 (
        IN                         := "proc_data".val1,
        L                          := 300,
        P                          := 1,
        RET_VAL                    := "proc_data".val1);

    CALL FC     4 (
        IN                         := "proc_data".val2,
        L                          := 300,
        P                          := 1,
        RET_VAL                    := "proc_data".val2);

//
// Eintragen erster Wert
```



```
//

    CALL FC     2 (
        IN1                        := "proc_data".md48,
        IN2                        := "proc_data".val1,
        RET_VAL                    := "proc_data".val2);

    CALL FC     4 (
        IN                         := "proc_data".val1,
        L                          := 300,
        P                          := 1,
        RET_VAL                    := "proc_data".val1);

    CALL FC     2 (
        IN1                        := "proc_data".tab,
        IN2                        := "proc_data".val2,
        RET_VAL                    := "proc_data".val1);

    CALL FC     4 (
        IN                         := "proc_data".val2,
        L                          := 300,
        P                          := 1,
        RET_VAL                    := "proc_data".val2);

//
// Eintragen zweiter Wert
//

    CALL FC     2 (
        IN1                        := "proc_data".md52,
        IN2                        := "proc_data".val1,
        RET_VAL                    := "proc_data".val2);

    CALL FC     4 (
        IN                         := "proc_data".val1,
        L                          := 300,
        P                          := 1,
        RET_VAL                    := "proc_data".val1);

    CALL FC     2 (
        IN1                        := "proc_data".tab,
        IN2                        := "proc_data".val2,
        RET_VAL                    := "proc_data".val1);

    CALL FC     4 (
        IN                         := "proc_data".val2,
        L                          := 300,
        P                          := 1,
        RET_VAL                    := "proc_data".val2);

//
// Eintragen dritter Wert
//

    CALL FC     2 (
        IN1                        := "proc_data".md56,
        IN2                        := "proc_data".val1,
        RET_VAL                    := "proc_data".val2);

    CALL FC     4 (
        IN                         := "proc_data".val1,
        L                          := 300,
        P                          := 1,
        RET_VAL                    := "proc_data".val1);

    CALL FC     2 (
        IN1                        := "proc_data".tab,
```

```
          IN2                     := "proc_data".val2,
          RET_VAL                 := "proc_data".val1);

     CALL FC     4 (
          IN                      := "proc_data".val2,
          L                       := 300,
          P                       := 1,
          RET_VAL                 := "proc_data".val2);

//
// Eintragen vierter Wert
//

     CALL FC     2 (
          IN1                     := "proc_data".md60,
          IN2                     := "proc_data".val1,
          RET_VAL                 := "proc_data".val2);

     CALL FC     4 (
          IN                      := "proc_data".val1,
          L                       := 300,
          P                       := 1,
          RET_VAL                 := "proc_data".val1);

     CALL FC     2 (
          IN1                     := "proc_data".tab,
          IN2                     := "proc_data".val2,
          RET_VAL                 := "proc_data".val1);

     CALL FC     4 (
          IN                      := "proc_data".val2,
          L                       := 300,
          P                       := 1,
          RET_VAL                 := "proc_data".val2);

//
// Eintragen fünfter Wert
//

     CALL FC     2 (
          IN1                     := "proc_data".md68,
          IN2                     := "proc_data".val1,
          RET_VAL                 := "proc_data".val2);

     CALL FC     4 (
          IN                      := "proc_data".val1,
          L                       := 300,
          P                       := 1,
          RET_VAL                 := "proc_data".val1);

     CALL FC     2 (
          IN1                     := "proc_data".tab,
          IN2                     := "proc_data".val2,
          RET_VAL                 := "proc_data".val1);

     CALL FC     4 (
          IN                      := "proc_data".val2,
          L                       := 300,
          P                       := 1,
          RET_VAL                 := "proc_data".val2);
//
// Eintragen sechster Wert
//

     CALL FC     2 (
          IN1                     := "proc_data".md72,
          IN2                     := "proc_data".val1,
```



```
          RET_VAL                 := "proc_data".val2);

     CALL FC     4 (
          IN                      := "proc_data".val1,
          L                       := 300,
          P                       := 1,
          RET_VAL                 := "proc_data".val1);

     CALL FC     2 (
          IN1                     := "proc_data".tab,
          IN2                     := "proc_data".val2,
          RET_VAL                 := "proc_data".val1);

     CALL FC     4 (
          IN                      := "proc_data".val2,
          L                       := 300,
          P                       := 1,
          RET_VAL                 := "proc_data".val2);
//
// Eintragen siebenter Wert
//

     CALL FC     2 (
          IN1                     := "proc_data".md76,
          IN2                     := "proc_data".val1,
          RET_VAL                 := "proc_data".val2);

     CALL FC     4 (
          IN                      := "proc_data".val1,
          L                       := 300,
          P                       := 1,
          RET_VAL                 := "proc_data".val1);

     CALL FC     2 (
          IN1                     := "proc_data".tab,
          IN2                     := "proc_data".val2,
          RET_VAL                 := "proc_data".val1);

     CALL FC     4 (
          IN                      := "proc_data".val2,
          L                       := 300,
          P                       := 1,
          RET_VAL                 := "proc_data".val2);
//
// Eintragen achter Wert
//

     CALL FC     2 (
          IN1                     := "proc_data".md80,
          IN2                     := "proc_data".val1,
          RET_VAL                 := "proc_data".val2);

     CALL FC     4 (
          IN                      := "proc_data".val1,
          L                       := 300,
          P                       := 1,
          RET_VAL                 := "proc_data".val1);

     CALL FC     2 (
          IN1                     := "proc_data".tab,
          IN2                     := "proc_data".val2,
          RET_VAL                 := "proc_data".val1);

     CALL FC     4 (
          IN                      := "proc_data".val2,
          L                       := 300,
          P                       := 1,
```

```
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);
//
// Eintragen neunter Wert
//

     CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".md176,
          IN2                       := "proc_data".val1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);

     CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val1,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

     CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".tab,
          IN2                       := "proc_data".val2,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

     CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val2,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);
//
// Eintragen zehnter Wert
//

     CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".mw150,
          IN2                       := "proc_data".val1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);

     CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val1,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

     CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".tab,
          IN2                       := "proc_data".val2,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

     CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val2,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);
//
// Eintragen elfter Wert
//

     CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".mw152,
          IN2                       := "proc_data".val1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);

     CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val1,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

     CALL FC     2 (
```



```
          IN1                       := "proc_data".tab,
          IN2                       := "proc_data".val2,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

     CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val2,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);
//
// Eintragen zwölfter Wert
//

     CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".mw154,
          IN2                       := "proc_data".val1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);

     CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val1,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

     CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".tab,
          IN2                       := "proc_data".val2,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

     CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val2,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);
//
// Eintragen 13. Wert
//

     CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".mw154,
          IN2                       := "proc_data".val1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);

     CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val1,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

     CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".tab,
          IN2                       := "proc_data".val2,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

     CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val2,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);

//
// Eintragen 14. Wert
//

     CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".mw156,
          IN2                       := "proc_data".val1,
```

```
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);

      CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val1,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

      CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".tab,
          IN2                       := "proc_data".val2,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

      CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val2,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);

//
// Eintragen 15. Wert
//

      CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".mw158,
          IN2                       := "proc_data".val1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);

      CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val1,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

      CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".tab,
          IN2                       := "proc_data".val2,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

      CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val2,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);

//
// Eintragen 16. Wert
//

      CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".mw160,
          IN2                       := "proc_data".val1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);

      CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val1,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

      CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".tab,
          IN2                       := "proc_data".val2,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

      CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val2,
```



```
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);

//
// Eintragen 17. Wert
//

      CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".mw162,
          IN2                       := "proc_data".val1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);

      CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val1,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

      CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".tab,
          IN2                       := "proc_data".val2,
          RET_VAL                   := "proc_data".val1);

      CALL FC     4 (
          IN                        := "proc_data".val2,
          L                         := 300,
          P                         := 1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);
//
// Eintragen 18. Wert
//

      CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".mw164,
          IN2                       := "proc_data".val1,
          RET_VAL                   := "proc_data".val2);

//
//  final set in
//

      CALL FC     2 (
          IN1                       := "proc_data".tab,
          IN2                       := "proc_data".val2,
          RET_VAL                   := "print_db_data".carsten);

//
// output string finished
//

//
// Define print request to CP441
//

      CALL "PRINT" , DB    16 (
          REQ                       := M    300.0,
          ID                        := W#16#1003,
          DONE                      := M    300.1,
          ERROR                     := M    300.2,
          STATUS                    := MW   308,
          PRN_NR                    := MB   304,
          FORMAT                    := "print_db".Anna,
          SD_1                      := "print_db_data".carsten);
//
// Query status of connection
//
```

```
      CALL "STATUS" , DB    22 (
           REQ                    := M    301.0,
           ID                     := W#16#1003,
           NDR                    := M    301.1,
           ERROR                  := M    301.2,
           STATUS                 := MW   310,
           PHYS                   := P#M 14.0 WORD 1,
           LOG                    := P#M 16.0 WORD 1,
           LOCAL                  := P#M 420.0 BYTE 16);
//
//Activate trigger for print request
//
      UN    M    300.1;
      S     M    300.0;
      O     M    300.1;
      O     M    300.2;
      R     M    300.0;
//
      U     M    300.2;
      S     M    301.0;
      O     M    301.1;
      O     M    301.2;
      R     M    301.0;
      BE    ;
END_FUNCTION_BLOCK

ORGANIZATION_BLOCK OB 1
TITLE =Gasregelung
//Dieser OB steuert die Gasregelung.
AUTHOR : Heiss
FAMILY : Regelkr
NAME : RUN
VERSION : 0.1


VAR_TEMP
  OB1_EV_CLASS : BYTE ; //Bits 0-3 = 1 (Coming event), Bits 4-7 = 1 (Event class 1)
  OB1_SCAN_1 : BYTE ;   //1 (Cold restart scan 1 of OB 1), 3 (Scan 2-n of OB 1)
  OB1_PRIORITY : BYTE ; //1 (Priority of 1 is lowest)
  OB1_OB_NUMBR : BYTE ; //1 (Organization block 1, OB1)
  OB1_RESERVED_1 : BYTE ;     //Reserved for system
  OB1_RESERVED_2 : BYTE ;     //Reserved for system
  OB1_PREV_CYCLE : INT ;      //Cycle time of previous OB1 scan (milliseconds)
  OB1_MIN_CYCLE : INT ; //Minimum cycle time of OB1 (milliseconds)
  OB1_MAX_CYCLE : INT ; //Maximum cycle time of OB1 (milliseconds)
  OB1_DATE_TIME : DATE_AND_TIME ;   //Date and time OB1 started
END_VAR
BEGIN
NETWORK
TITLE =

      L     MW   400; // Load count value
      +     1; // Increment
      T     MW   400;
      L     MW   400;
      L     500;
      <I    ;
      SPB   prnt;
      L     0;
      T     MW   400;
      UC    FB    50;
prnt: L     0;
      BLD   130;

NETWORK
TITLE =Pumpenvorlauf 1
//Das NW überprüft den Pumpenvordruck und den Auslaßdruck_minus. Das weitere
```



```
//Programm läuft erst ab, wenn diese beiden Werte bestimmten Sollvorgaben genügen.
      U(    ;
      U(    ;
      L     "Pumpenvordruck";
      T     "Pumpenvordruck-kontr.";
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _001;
      L     "Auslaßdruck_minus";
      T     "Auslassdruck_minus-kont.";
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_001: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _002;
      L     "Auslassdruck_minus-kont.";
      L     "Pumpenvordruck-kontr.";
      -I    ;
      T     "Ausgangsdruck_delta";
_002: NOP   0;
NETWORK
TITLE =Pumpenvorlauf 2
//Zum Erreichen dieser Werte hat das System 6 Minuten Zeit. Wenn nach Ablauf der
//Zeit noch nicht die gewünschten Verhältnisse hergestellt sind, liegt eine
//Störung vor und das System wechselt zurück in einen sicheren Zustand.
      UN    M      0.2;
      UN    "Störung";
      L     S5T#6M;
      SE    "Timer-Pumpenvorlauf";
NETWORK
TITLE =Pumpenvorlauf 3

      U(    ;
      UN    M      0.2;
      U(    ;
      L     "Pumpenvordruck-kontr.";
      L     20000;
      >I    ;
      )     ;
      O     ;
      UN    M      0.2;
      U(    ;
      L     "Auslassdruck_minus-kont.";
      L     20000;
      >I    ;
      )     ;
      O     ;
      UN    M      0.2;
      U(    ;
      L     "Ausgangsdruck_delta";
      L     300;
      >I    ;
      )     ;
      )     ;
      UN    "Timer-Pumpenvorlauf";
      UN    "Störung";
      SPB   M001;
NETWORK
TITLE =Pumpenvorlauf

      U     "Timer-Pumpenvorlauf";
      UN    M      0.2;
      S     "Störung";
```

```
NETWORK
TITLE =Pumpenvorlauf

      U     "Timer-Pumpenvorlauf";
      UN    M      0.2;
      SPB   M002;
NETWORK
TITLE =Pumpenvorlauf erfolgreich
//Werden die Sollvorgaben des Pumpenvorlaufes - vor Ablauf der Zeit - erfüllt,
//startet das eigentliche Programm. In diesem NW werden einmalig die Anfangswerte
//des zyklischen Programmablaufes gesetzt.
      UN    M      0.2;
      UN    "Störung";
      S     "PN´s_MFC";
      S     "PID_Relais";
      S     "Gas-ok.";
NETWORK
TITLE =Sperren der Anfangswerte
//Dieses NW sperrt die Anfangswerte des Systems, die nach erfolgreichem Vorlauf
//der Pumpe einmal angenommen werden für den weiteren Programmablauf.
      UN    M      1.0;
      S     M      0.2;
NETWORK
TITLE =Schließen der Kammerbelüftung
//Das NW schließt -nach Ablauf einer Wartezeit- die Kammerbelüftung.
      UN    "Störung";
      UN    M      0.3;
      UN    M      0.4;
      L     S5T#1M;
      SV    "Timer-Kammerbelüftung";
NETWORK
TITLE =Schließen der Kammerbelüftung

      U     "Timer-Kammerbelüftung";
      =     M      0.4;
NETWORK
TITLE =Schließen der Kammerbelüftung

      U     M      0.4;
      SPB   M001;
NETWORK
TITLE =Schließen der Kammerbelüftung

      UN    M      1.0;
      UN    "Störung";
      S     M      0.3;
      S     "PN´s_Kammer";
NETWORK
TITLE =PID Alarme kontrollieren
//Nach dem Umschalten der Kammerbelüftungsventile -und nach Ablauf eines Delays-
//kontrolliert das NW ständig, ob der PID einen Alarm auslöst. Ist dies der Fall
//wird das PID Relais umgeschaltet, so daß der PID ausgeschaltet wird und die
//Pneumatik in ihre normaly-Stellung geht. Das System befindet sich dann in einem
//sicheren Zustand.
      UN    M      1.0;
      L     S5T#5S;
      SE    "Delay";
NETWORK
TITLE =PID Alarme kontrollieren

      U     "Delay";
      S     M      0.6;
NETWORK
TITLE =PID Alarme kontrollieren

      UN    M      0.6;
      SPB   M001;
```



```
NETWORK
TITLE =PID Alarme kontrollieren
//Das NW verhindert, daß nach der Auslösung eines PID Alarmes das System wieder
//selbständig gestartet wird, wenn der Alarm nicht mehr vorhanden ist.
      U     "PID_Alarm1";
      U     "PID_Alarm2";
      NOT   ;
      R     "PID_Relais";
NETWORK
TITLE =Variablenumrechnung
//Das NW rechnet die Werte der Variablen des Systems in physikalische Einheiten
//um. (hier:Einlaßdruck)
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      L     "Einlaßdruck";
      T     MW   100;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _003;
      L     MW   100;
      T     MW   250;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_003: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _004;
      L     MW   100;
      ITD   ;
      T     MD   100;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_004: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _005;
      L     MD   100;
      DTR   ;
      T     MD   100;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_005: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _006;
      L     MD   100;
      L     3.611151e-002;
      *R    ;
      T     "Einlaßdruck***";
_006: NOP   0;
NETWORK
TITLE =Variablenumrechnung
//Das NW rechnet die Werte der Variablen des Systems in physikalische Einheiten
//um.  (hier: Pumpenvordruck)
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      L     "Pumpenvordruck";
      T     MW   104;
```

```
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _007;
      L     MW   104;
      T     MW   252;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_007: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _008;
      L     MW   104;
      ITD   ;
      T     MD   104;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_008: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _009;
      L     6.000000e+002;
      T     MD    96;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_009: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _00a;
      L     MD   104;
      DTR   ;
      T     MD   104;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_00a: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _00b;
      L     MD   104;
      L     2.166691e-002;
      *R    ;
      T     MD   104;
      UN    OV;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_00b: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _00c;
      L     MD   104;
      L     MD    96;
      -R    ;
      T     "Pumpenvordruck***";
_00c: NOP   0;
NETWORK
TITLE =Variablenumrechnung
//Das NW rechnet die Werte der Variablen des Systems in physikalische Einheiten
//um.  (hier: Auslaßdruck_minus)
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      L     "Auslaßdruck_minus";
      T     MW   108;
      SET   ;
```



```
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _00d;
      L     MW   108;
      T     MW   254;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_00d: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _00e;
      L     MW   108;
      ITD   ;
      T     MD   108;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_00e: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _00f;
      L     MD   108;
      DTR   ;
      T     MD   108;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_00f: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _010;
      L     MD   108;
      L     2.166691e-002;
      *R    ;
      T     MD   108;
      UN    OV;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_010: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _011;
      L     MD   108;
      L     MD    96;
      -R    ;
      T     "Auslaßdruck_minus***";
_011: NOP   0;
NETWORK
TITLE =Variablenumrechnung
//Das NW rechnet die Werte der Variablen des Systems in physikalische Einheiten
//um.  (hier: Einlaßfluß)
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      L     "Einlaßfluß";
      T     MW   112;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _012;
      L     MW   112;
      T     MW   256;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
```

```
_012: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _013;
      L     MW   112;
      ITD   ;
      T     MD   112;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_013: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _014;
      L     MD   112;
      DTR   ;
      T     MD   112;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_014: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _015;
      L     MD   112;
      L     1.805576e-002;
      *R    ;
      T     "Einlaßfluß***";
_015: NOP   0;
NETWORK
TITLE =Variablenumrechnung
//Das NW rechnet die Werte der Variablen des Systems in physikalische Einheiten
//um.  (hier: Auslaßfluß)
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      L     "Auslaßfluß";
      T     MW   116;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _016;
      L     MW   116;
      ITD   ;
      T     MD   116;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_016: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _017;
      L     MD   116;
      DTR   ;
      T     MD   116;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_017: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _018;
      L     MD   116;
      L     1.805576e-002;
      *R    ;
      T     "Auslaßfluß***";
_018: NOP   0;
NETWORK
TITLE =Zero-Offset der Druckdosen
//In diesem NW werden die Offsetwerte der Druckdosen in Merkern gespeichert.
```



```
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      L     0;
      T     MD   200;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _019;
      L     0;
      T     MD   204;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_019: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _01a;
      L     60;
      T     MD   208;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_01a: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _01b;
      L     120;
      T     MD   212;
_01b: NOP   0;
NETWORK
TITLE =Variablenumrechnung
//Das NW rechnet die Werte der Variablen des Systems in physikalische Einheiten
//um.  (hier: Kammerdruck)
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      L     "Kammerdruck";
      T     MW   120;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _01c;
      L     MW   120;
      ITD   ;
      T     MD   120;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_01c: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _01d;
      L     MD   120;
      DTR   ;
      T     MD   120;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_01d: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _01e;
      L     MD   120;
      L     MD   200;
      -R    ;
```

```
      T     MD   120;
      UN    OV;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_01e: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _01f;
      L     MD   120;
      L     3.617422e-002;
      *R    ;
      T     "Kammerdruck***";
_01f: NOP   0;
NETWORK
TITLE =Variablenumrechnung
//Das NW rechnet die Werte der Variablen des Systems in physikalische Einheiten
//um.  (hier: Kammerreferenzdruck)
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      L     "Kammerreferenzdruck";
      T     MW   124;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _020;
      L     MW   124;
      ITD   ;
      T     MD   124;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_020: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _021;
      L     MD   124;
      DTR   ;
      T     MD   124;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_021: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _022;
      L     MD   124;
      L     MD   204;
      -R    ;
      T     MD   124;
      UN    OV;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_022: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _023;
      L     MD   124;
      L     3.617422e-002;
      *R    ;
      T     "Kammerreferenzdruck***";
_023: NOP   0;
NETWORK
TITLE =Variablenumrechnung
//Das NW rechnet die Werte der Variablen des Systems in physikalische Einheiten
//um.  (hier: Kammereinlaßdruck)
      U(    ;
      U(    ;
```



```
      U(    ;
      U(    ;
      L     "Kammereinlaßdruck";
      T     MW   128;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _024;
      L     MW   128;
      ITD   ;
      T     MD   128;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_024: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _025;
      L     MD   128;
      DTR   ;
      T     MD   128;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_025: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _026;
      L     MD   128;
      L     MD   208;
      -R    ;
      T     MD   128;
      UN    OV;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_026: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _027;
      L     MD   128;
      L     3.619516e-003;
      *R    ;
      T     "Kammereinlaßdruck***";
_027: NOP   0;
NETWORK
TITLE =Variablenumrechnung
//Das NW rechnet die Werte der Variablen des Systems in physikalische Einheiten
//um.  (hier: Kammerauslaßdruck)
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      L     "Kammerauslaßdruck";
      T     MW   132;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _028;
      L     MW   132;
      ITD   ;
      T     MD   132;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_028: U     BIE;
      )     ;
```

```
      SPBNB _029;
      L     MD   132;
      DTR   ;
      T     MD   132;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_029: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _02a;
      L     MD   132;
      L     MD   212;
      -R    ;
      T     MD   132;
      UN    OV;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_02a: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _02b;
      L     MD   132;
      L     3.619516e-003;
      *R    ;
      T     "Kammerauslaßdruck***";
_02b: NOP   0;
NETWORK
TITLE =Variablenumrechnung
//Das NW rechnet die Werte der Variablen des Systems in physikalische Einheiten
//um.  (hier: Außlaßfluß_In)
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      L     "Auslaßfluß_In";
      T     MW   136;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _02c;
      L     MW   136;
      ITD   ;
      T     MD   136;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_02c: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _02d;
      L     MD   136;
      DTR   ;
      T     MD   136;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_02d: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _02e;
      L     MD   136;
      L     1.805576e-002;
      *R    ;
      T     "Auslaßfluß_In***";
_02e: NOP   0;
NETWORK
TITLE =4 mA Funktionalitätsüberprüfung
//Dieses NW überprüft, ob die Geräte, die Analogeingänge (4 - 20 mA) in die SPS
//liefern, funktionieren.
```



```
//Die entsprechenden Geräte müssen jederzeit mindestens 4 mA liefern.
//Ist dies nicht der Fall, handelt es sich um eine Störung.
      O(    ;
      L     MW   250;
      L     32767;
      ==I   ;
      )     ;
      O(    ;
      L     MW   252;
      L     32767;
      ==I   ;
      )     ;
      O(    ;
      L     MW   254;
      L     32767;
      ==I   ;
      )     ;
      O(    ;
      L     MW   256;
      L     32767;
      ==I   ;
      )     ;
      S     "Störung";
NETWORK
TITLE =Störungsüberprüfung
//Dieses NW überprüft, ob eine Störung vorliegt.
//Es - setzt in diesem Fall den Störungsausgang (-> Signalhupe an).
//   - rücksetzt die Meldung "Gassystem ok.".
//
      U(    ;
      L     "Einlaßdruck";
      T     "Einlaßdruck-kontrolle";
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      U(    ;
      L     "Einlaßdruck-kontrolle";
      L     3500;
      <I    ;
      )     ;
      O(    ;
      U(    ;
      L     "Pumpenvordruck";
      T     "Pumpenvordruck-kontr.";
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      U(    ;
      L     "Pumpenvordruck-kontr.";
      L     20000;
      >I    ;
      )     ;
      )     ;
      O(    ;
      U(    ;
      L     "Auslaßdruck_minus";
      T     "Auslassdruck_minus-kont.";
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      U(    ;
```

```
      L     "Auslassdruck_minus-kont.";
      L     20000;
      >I    ;
      )     ;
      )     ;
      O(    ;
      U(    ;
      L     "Einlaßfluß";
      T     "Einlaßfluß-kontrolle";
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      U(    ;
      L     "Einlaßfluß-kontrolle";
      L     6000;
      >I    ;
      )     ;
      )     ;
      O(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      L     "Kammereinlaßdruck";
      T     "Kammereindruck-kontr.";
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _02f;
      L     "Kammereindruck-kontr.";
      ITD   ;
      T     MD   168;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_02f: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _030;
      L     MD   168;
      DTR   ;
      T     MD   168;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_030: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _031;
      L     MD   168;
      ABS   ;
      T     MD   168;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_031: U     BIE;
      )     ;
      U(    ;
      L     "Kammereindruck-kontr.";
      L     1000;
      >I    ;
      )     ;
      )     ;
      O(    ;
      U(    ;
```



```
      U(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      L     "Kammerauslaßdruck";
      T     "Kammerausdr.-kontrolle";
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _032;
      L     "Kammerausdr.-kontrolle";
      ITD   ;
      T     MD   172;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_032: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _033;
      L     MD   172;
      DTR   ;
      T     MD   172;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_033: U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _034;
      L     MD   172;
      ABS   ;
      T     MD   172;
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_034: U     BIE;
      )     ;
      U(    ;
      L     "Kammerausdr.-kontrolle";
      L     -1000;
      <I    ;
      )     ;
      )     ;
      O(    ;
      U(    ;
      L     "Auslassdruck_minus-kont.";
      L     "Pumpenvordruck-kontr.";
      -I    ;
      T     "Ausgangsdruck_delta";
      UN    OV;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      U(    ;
      L     "Ausgangsdruck_delta";
      L     300;
      >I    ;
      )     ;
      )     ;
      O(    ;
      U(    ;
      L     "Kammerdruck";
      T     "Kammerdruck-kontrolle";
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
```

```
      U     BIE;
      )     ;
      U(    ;
      O(    ;
      L     "Kammerdruck-kontrolle";
      L     16600;
      >I    ;
      )     ;
      O(    ;
      L     "Kammerdruck-kontrolle";
      L     0;
      <I    ;
      )     ;
      )     ;
      )     ;
      O(    ;
      U(    ;
      U(    ;
      L     MD   168;
      L     MD   172;
      -R    ;
      T     "Kammer(E/A)druck_delta";
      UN    OV;
      SAVE  ;
      CLR   ;
      U     BIE;
      )     ;
      SPBNB _035;
      L     "Kammer(E/A)druck_delta";
      ABS   ;
      T     "Kammer(E/A)druck_delta";
      SET   ;
      SAVE  ;
      CLR   ;
_035: U     BIE;
      )     ;
      U(    ;
      L     "Kammer(E/A)druck_delta";
      L     4.500000e+002;
      >R    ;
      )     ;
      )     ;
      ON    "DruckSch_Einlaß";
      ON    "DruckSch_Auslaß";
      S     "Störung";
NETWORK
TITLE =Störungsfall
//Dieses NW wird im Falle einer Störung bearbeitet. Es führt das System in einen
//sicheren Zustand, indem es - das PID-Relais abschaltet (-> Ventile schalten um).
//                           - das Pumpen-Relais abschaltet.
//                           - zusätzlich separat die Ventile umschaltet.
M002: U     "Störung";
      UN    M      0.1;
      R     "PID_Relais";
      R     "Pum_Relais";
      R     "PN´s_Kammer";
      R     "PN´s_MFC";
      R     "Gas-ok.";
      S     "Signalhupe";
      R     "Resetdelay";
      R     M      0.5;
NETWORK
TITLE =Störungsfall

      U     "Störung";
      S     "Lampe_Störung";
NETWORK
```



```
TITLE =Reset des Störungssignals
//Dieses NW bearbeitet einen möglichen Reset des Störungssignals. Es läßt das
//Signal nach Betätigung des Schalters für 1 Stunde verstummen.
      U     "Störung";
      U     "Reset-Schalter";
      S     M      0.1;
NETWORK
TITLE =Reset des Störungsalarms

      U     M      0.1;
      R     "Signalhupe";
      L     S5T#1H;
      SE    "Resetdelay";
NETWORK
TITLE =Reset des Störungsalarms

      U     "Resetdelay";
      S     M      0.5;
NETWORK
TITLE =Reset des Störungsalarms

      U     M      0.5;
      R     M      0.1;
NETWORK
TITLE =

M001: UN    M      1.0;
      =     M      0.0;
      BE    ;

END_ORGANIZATION_BLOCK

ORGANIZATION_BLOCK OB 100
TITLE =Anlauf Organisationsbaustein
//Dieser OB beschreibt den Anlauf des Systems. Er wird nach dem Start ein einziges
//Mal bearbeitet.
AUTHOR : Heiss
FAMILY : Regelkr
NAME : Anlauf
VERSION : 0.1


VAR_TEMP
  OB100_EV_CLASS : BYTE ;     //16#13, Event class 1, Entering event state, Event
logged in diagnostic buffer
  OB100_STRTUP : BYTE ; //16#81/82/83/84 Method of startup
  OB100_PRIORITY : BYTE ;     //27 (Priority of 1 is lowest)
  OB100_OB_NUMBR : BYTE ;     //100 (Organization block 100, OB100)
  OB100_RESERVED_1 : BYTE ;   //Reserved for system
  OB100_RESERVED_2 : BYTE ;   //Reserved for system
  OB100_STOP : WORD ;   //Event that caused CPU to stop (16#4xxx)
  OB100_STRT_INFO : DWORD ;   //Information on how system started
  OB100_DATE_TIME : DATE_AND_TIME ; //Date and time OB100 started
END_VAR
BEGIN
NETWORK
TITLE =Anfangseinstellungen
//Dieses NW legt die Anfangseinstellungen des Systems fest.
//(M1.0 ist immer 0)
      UN    M      1.0;
      R     "Signalhupe";
      R     "Timer-Kammerbelüftung";
      R     "Delay";
      R     "Timer-Pumpenvorlauf";
      R     "PN´s_Kammer";
      R     "Lampe_Störung";
      R     "PN´s_MFC";
```

```
      R     "PID_Relais";
      S     "Pum_Relais";
      R     "Gas-ok.";
NETWORK
TITLE =Anfangseinstellungen
//Dieses NW legt die Anfangseinstellungen der Merker fest.
//(M1.0 ist immer 0)
      UN    M      1.0;
      R     M      0.0;
      R     M      0.1;
      R     M      0.2;
      R     M      0.3;
      R     M      0.4;
      R     M      0.5;
      R     M      0.6;
      R     "Störung";
NETWORK
TITLE =

      L     0;
      T     MW   320;
      CLR   ;
      =     M    300.0;
      =     M    301.0;
      CALL "PRINT" , DB    16 (
           REQ                        := M    300.0,
           ID                         := W#16#1003,
           DONE                       := M    300.1,
           ERROR                      := M    300.2,
           STATUS                     := MW   308,
           PRN_NR                     := MB   304);
      CALL "STATUS" , DB    22 (
           REQ                        := M    301.0,
           ID                         := W#16#1003,
           NDR                        := M    301.1,
           ERROR                      := M    301.2,
           STATUS                     := MW   310,
           PHYS                       := P#M 14.0 WORD 1,
           LOG                        := P#M 16.0 WORD 1,
           LOCAL                      := P#M 420.0 BYTE 16);

END_ORGANIZATION_BLOCK
```

Anhang B

Programm der Gasmischanlage

Dieser Anhang enthält den Datenbaustein zur Programmierung des Textdisplays der Gasmischanlage und das auf der S7-200 ablaufende Programm in der Anweisungsliste.

Im Gegensatz zum Programm der Gasregelung können hier die Anfangseinstellungen, der zyklische Programmablauf, Initialisierungen und Unterprogramme in einem einzigen Programm zusammengefaßt werden.

Im wesentlichen gliedert sich der Programmcode in vier Teile:

- **Anfangseinstellungen**: Dieser Teil legt die Anfangseinstellungen der Mischanlage fest. Ein Sondermerker sorgt dafür, daß dieser Teil beim weiteren zyklischen Programmablauf übersprungen wird.

- **Initialisierung des Textdisplays**

- **zyklischer Programmablauf**

- **PID-Regelung**: Ein Unterprogramm, das in einer bestimmten Frequenz (Interruptzeit = 100 msec) aufgerufen wird, führt die PID-Regelung des Systems durch.

Um die im Programm verwendeten symbolischen Adressen den logischen Adressen der SPS zuordnen zu können, ist im folgenden die Symboltabelle[1] aufgeführt:

[1]Die in der Symboltabelle verwendeten Abkürzungen bedeuten dabei folgendes:
S = Signal vorhanden, kS = kein Signal vorhanden
Die Tabelle enthält Zuordnungen zu allen maximal verfügbaren Ein- und Ausgängen.

Symbol	Adresse	Datentyp	Kommentar
SchalterDisplay_1	A 0.0	BOOL	S - Anzeigedisplays zeigen Werte des 1.Kreislaufs an
PV1_g+PV2_g	A 0.1	BOOL	S - PV offen wird angezeigt (= Anzeige: Gas fließt)
PV3_g+PV4_g	A 0.2	BOOL	S - PV offen wird angezeigt (= Anzeige: Gas fließt)
PV1+PV2	A 0.3	BOOL	S - Ventile offen (= Gas fließt)
PV3+PV4	A 0.4	BOOL	S - Ventile offen (= Gas fließt)
PV5_g	A 0.5	BOOL	S - PV offen wird angezeigt (= Anzeige: Gas fließt)
PV6+PV6_g	A 0.6	BOOL	S - Ventil offen + Anzeige: Gas fließt
PV7+PV7_g	A 0.7	BOOL	S - Ventil offen + Anzeige: Gas fließt
PV8+PV10	A 1.0	BOOL	S - Ventile offen (= Gas fließt)
PV9+PV9_g	A 1.1	BOOL	S - Ventil offen + Anzeige: Gas fließt
PV8_g+PV10_g	A 2.0	BOOL	S - PV offen wird angezeigt (= Anzeige: Gas fließt)
MV1_g	A 2.1	BOOL	S - MV offen wird angezeigt (= Anzeige: Gas fließt)
MV2_g	A 2.2	BOOL	S - MV offen wird angezeigt (= Anzeige: Gas fließt)
MV3_g	A 2.3	BOOL	S - MV offen wird angezeigt (= Anzeige: Gas fließt)
MV4_g	A 2.4	BOOL	S - MV offen wird angezeigt (= Anzeige: Gas fließt)
Pumpe+Pumpe_g	A 2.5	BOOL	S - Kreislaufpumpe an + Anzeige des Betriebes
Störung	A 2.6	BOOL	kS - Störung aufgetreten + Störungsmeldung an S7-400
S7_200_ok_g	A 2.7	BOOL	S - S7-200 ok wird angezeigt
Signalhupe	A 3.0	BOOL	S - Hupe an (Störungsalarm)
S7_400_ok_g	A 3.1	BOOL	S - S7-400 ok wird angezeigt
N2_r	A 3.2	BOOL	S - Stickstoffspülung wird angezeigt
Reset_r	A 3.3	BOOL	S - Resetanforderung wird angezeigt
	A 3.4	BOOL	
SchalterDisplay_2	A 3.5	BOOL	S - Anzeigedisplays zeigen Werte des 2.Kreislaufs an
Defekt_Kreislauf_r	A 3.6	BOOL	S - Defekt in Kreislauf wird angezeigt
PV5	A 3.7	BOOL	S - Ventil geschlossen (= Belüftung geschlossen)
Reset	E 0.0	BOOL	S - Reset wird angefordert
Druckschalter	E 0.1	BOOL	S - Druckschalter melden keine Störung
	E 0.2	BOOL	
Hupe_reset	E 0.3	BOOL	S - Hupenreset
LV	E 0.4	BOOL	S - LV vorhanden
MV1_Status	E 0.5	BOOL	S - Magnetventil ist offen (Gas fließt)
MV2_Status	E 0.6	BOOL	S - Magnetventil ist offen (Gas fließt)
MV3_Status	E 0.7	BOOL	S - Magnetventil ist offen (Gas fließt)
MV4_Status	E 1.0	BOOL	S - Magnetventil ist offen (Gas fließt)
	E 1.1	BOOL	
Spülung-N	E 1.2	BOOL	S - Stickstoffspülung wird angefordert
Messung-N	E 1.3	BOOL	S - Stickstoffinertisierung ist ok.
	E 1.4	BOOL	
Status_S7_400	E 1.5	BOOL	S - S7-400 ist ok.

Druck_Faß	AEW0	WORD	Druckmessung durch Absolutdruckdose
Fluß_Ar_1	AEW2	WORD	MFC2
Fluß_Ar_2	AEW4	WORD	MFC4
Fluß_DME_1	AEW8	WORD	MFC1
Fluß_DME_2	AEW10	WORD	MFC3
Gesamtfluß	AEW12	WORD	MFM
Dr_DME_Leit.	AEW16	WORD	Druckmessung in DME-Versorgungsleitung
Dr_Ar_Leit.	AEW18	WORD	Druckmessung in Ar-Versorgungsleitung
Masse_DME_Fla.	AEW20	WORD	Masse der DME-Flasche
Dr_Ar_Fla.	AEW24	WORD	Druck in der Argon-Flasche
Dr_Bypass	AEW26	WORD	Druck in der Bypass-Leitung
	AEW28	WORD	
FMC1_Soll	AAW0	WORD	Eingang in MFC1 (DME1)
FMC2_Soll	AAW4	WORD	Eingang in MFC2 (Ar1)
FMC3_Soll	AAW8	WORD	Eingang in MFC3 (DME2)
FMC4_Soll	AAW12	WORD	Eingang in MFC4 (Ar2)
Mischung_Anzeige	AAW16	WORD	Fraction = Anteil von DME in Prozent

```
----------------------------------------
//
//Datenbaustein für TD200
//
// BEGIN TD200_BLOCK 0
// (Innerhalb dieses Blocks dürfen Kommentare nicht verändert oder verschoben werden)
VB0     'TD'            // Kennung des TD 200
VB2     16#20           // Sprache Deutsch einstellen, Aktualisierung setzen auf So schnell wie möglich
VB3     16#71           // Anzeige mit 40 Zeichen einstellen;Nach-oben-Taste V3.2;Nach-unten-Taste V3.3
VB4     3               // Anzahl der Meldungen einstellen
VB5     0               // Meldebits der Funktionstasten setzen auf M0.0 - M0.7
VW6     40              // Anfangsadresse der Meldungen setzen auf VW40
VW8     12              // Anfangsadresse der Meldungs-Freigabebits setzen auf VW12
VW10    0000            //Globales Paßwort
// MESSAGE 1
// Meldungs-Freigabebit V12.7
VB40    'F1   CHANGE FRACTIONF2   FLUSH BARREL    '
// MESSAGE 2
// Meldungs-Freigabebit V12.6
VB80    'PREV. VALUE:    '
VB96    16#00           // Keine Bearbeitung; Keine Quittierung; Kein Paßwort;
VB97    16#32           // Wort ohne Vorzeichen; 2 Zeichen rechts vom Dezimalkomma;
VW98    16#00           // Eingebetteter Datenwert: Daten zur Anzeige hier anordnen.
VB100   'NEW   VALUE:  '
VB114   16#18           // Bearbeitungsmeldung V114.2; Keine Quittierung; Bearbeitung nur mit Paßwort;
VB115   16#52           // Realzahl (32 Bit); 2 Zeichen rechts vom Dezimalkomma;
VD116   16#0000 // Eingebetteter Datenwert: Daten zur Anzeige hier anordnen.
// MESSAGE 3

// Meldungs-Freigabebit V12.5
VB120   '(1=ON 0=OFF): '
VB134   16#00           // Keine Bearbeitung; Keine Quittierung; Kein Paßwort;
VB135   16#50           // Realzahl (32 Bit); 0 Zeichen rechts vom Dezimalkomma;
VD136   16#0000 // Eingebetteter Datenwert: Daten zur Anzeige hier anordnen.
VB140   'NEW   VALUE : '
VB154   16#18           // Bearbeitungsmeldung V154.2; Keine Quittierung; Bearbeitung nur mit Paßwort;
VB155   16#50           // Realzahl (32 Bit); 0 Zeichen rechts vom Dezimalkomma;
VD156   16#0000 // Eingebetteter Datenwert: Daten zur Anzeige hier anordnen.
// END TD200_BLOCK 0
----------------------------------------

----------------------------------------
//
```

```
//                      Steuerung der Gasmischanlage
//                      ****************************
//
//      Eingabe: 32767 --> Vollausschlag des Meßinstrumentes
//
//      Im Programm enthaltende Zahlenwerte:
//      ------------------------------------
//      - prev. Value Anteil von DME                        50 %
//      - prev. Value Faßspülung (0 = "aus")                0
//      - Druck in DME-Leitung maximal                      3 bar
//      - Druck in Ar- Leitung maximal                      3 bar
//      - Druck in Bypass maximal                           0,5 bar
//      - Druck in Faß maximal                              0,5 bar
//      - Zeit für Hupenreset                               30 min
//      - Zeit für Stickstoffspülung 1.Leitung              10 min
//      - Abweichung (Soll/Ist-MFC)                         < +/- 10 ml
//      - Abweichung (GesamtSoll/GesamtIst-MFM)             < +/- 10 ml
//      - Solldruck Faß                                     0,3 bar
//      - Verstärkung PID                                   0,25
//      - Abtastzeit PID                                    0,1 sec
//      - Integralzeit PID                                  30 min
//      - Differentialzeit PID                              aus
//      - Interruptzeit PID                                 100 msec
//      - Kalibrationsfaktor                                0,5
//

NETWORK 1
LBL    0

NETWORK 2       // Anfangseinstellungen
LD     SM0.1                 // Netzwerk wird nur im ersten Zyklus ausgeführt
O      E0.0                  // oder nach einem Master-Reset
O      M1.1                  // oder nach einem Sprung zu den Anfangswerten
U      E0.4                  // und wenn zusätzlich LV_ok. gesetzt ist
U      E1.5                  // und wenn zusätzlich S7400_ok. gesetzt ist
R      A0.0, 1               //     -> Display 1. Kreislauf nicht aktiv
R      A3.5, 1               //     -> Display 2. Kreislauf nicht aktiv
R      A0.3, 2               //     -> 1. Kreislauf schließen
R      A1.0, 2               //     -> 2. Kreislauf schließen
S      A3.7, 1               //     -> Ventil 5 (-> Belüftung) geschlossen (NO)
S      A0.6, 1               //     -> Ventil 6 (-> Systemzugang) auf + Lampe an
S      A0.7, 1               //     -> Ventil 7 (-> DME-Zuleitung) auf + Lampe an
R      A1.0, 1               //     -> Ventil 8 und 10 (-> N2-Zufuhr) geschlossen
S      A1.1, 1               //     -> Ventil 9 (-> Ar-Zufuhr) auf + Lampe an
MOVW   +0, AAW0              //     -> schließe alle Massenflußregler
MOVW   +0, AAW4
MOVW   +0, AAW8
MOVW   +0, AAW12
S      A2.5, 1               //     -> Kreislaufpumpe an + Lampe an
S      A2.6, 1               //     -> keine Störung vorhanden + keine Störungmeldung an S7_400
R      A3.0, 1               //     -> Signalhupe aus
R      M1.0, 8               //     -> setze alle Merker auf Null
S      M2.0, 1               //     -> setze Merker 2.0 auf Eins
R      T37, 1                //     -> setze alle Zeiten auf Null
R      T38, 1
R      T39, 1

NETWORK 3
LD     M2.0                  // Zeitdelay, bis auch die anderen Ventile geschaltet werden.
TON    T39, +1200

NETWORK 4
LD     T39                   // wenn Zeit abgelaufen (2min)
U      M2.0                  // und M2.0 noch gesetzt
S      A0.3, 1               //     -> Ventil 1 und 2 (-> Kreislauf 1) auf
R      A0.4, 1               //     -> Ventil 3 und 4 (-> Kreislauf 2) geschlossen
CALL   0                     //     -> Initialisierung PID
```

```
NETWORK 5
LD     T39                  // wenn Zeit abgelaufen (2min)
R      M2.0, 1              //      -> rücksetze Merker 2.0

NETWORK 6
LDN    M2.0                 // wenn Anfangsdelay abgelaufen
U      A0.3                 // wenn Kreislauf 1 geöffnet
S      A0.0, 1              //      -> schalte Logomodul-> Werte 1.Kreisl. anzeigen
NOT                         // wenn nicht
R      A0.0, 1              //      -> schalte Logomodul-> Werte 1.Kreisl. nicht anz.

NETWORK 7
LDN    M2.0                 // wenn Anfangsdelay abgelaufen
U      A0.4                 // wenn Kreislauf 2 geöffnet
S      A3.5, 1              //      -> schalte Logomodul-> Werte 2.Kreisl. anzeigen
NOT                         // wenn nicht
R      A3.5, 1              //      -> schalte Logomodul-> Werte 2.Kreisl. nicht anz.

//----------------------
//* TD200 - Textdisplay *
//----------------------
// Über das TD200 (Textdisplay) kann der Fractionwert (prozentualer Anteil von DME)
// eingegeben werden und der Faßspülmodus gesteuert.

NETWORK 8       // Anfangseinstellungen für TD 200
LD     SM0.1                // Netzwerk wird nur im ersten Zyklus ausgeführt
O      E0.0                 // oder nach einem Master-Reset
MOVR   50.00000, AC3        //      -> Anfangswert: ANTEIL  VON  DME = 50
MOVR   5000.000, AC0        //      -> setze als prev. Value 50.00 (Kommasetzung im TD)
TRUNC  AC0, AC0
MOVW   AC0, VW98
MOVR   0.0000000, VD136     //      -> Anfangswert: Faßspülung = 0 (= "aus")

NETWORK 9       // Initialisierung des TD200-Textdisplays
LD     SM0.1                // wird nur im ersten Zyklus ausgeführt
O      E0.0                 // oder nach einem Master-Reset
MOVB   16#80, VB12          //      -> aktiviere erste Meldung
MOVB   0, MB0               //      -> setze alle Bits für die Funktionstasten zurück

NETWORK 10
LDN    M2.0                 // wenn Anfangsdelay abgelaufen
U      M0.0                 // wurde F1 gedrückt
MOVB   16#40, VB12          // Meldung 2 anzeigen
R      M0.0, 1              // setze Merker zurück

NETWORK 11
LDN    M2.0                 // wenn Anfangsdelay abgelaufen
U      M0.1                 // wurde F2 gedrückt
MOVB   16#20, VB12          // Meldung 3 anzeigen
R      M0.1, 1              // setze Merker zurück

NETWORK 12
LDN    M2.0                 // wenn Anfangsdelay abgelaufen
U      V114.2               // wurde Bearbeitungsbit gesetzt (Meldung 2)
R      V114.2, 1            // Bearbeitungbit rücksetzen
MOVR   VD116, AC1           // bearbeitete Realzahlwert holen
MOVR   AC1, AC3             // in AC3 steht neues Verhältnis als Realzahl
*R     100.0000, AC1        // zum Skalieren mit 100 multiplizieren
TRUNC  AC1, AC1             // in ganze Zahl wandeln
MOVW   AC1, VW98            // früheren Wert aktualisieren
MOVB   16#80, VB12          // Meldung 1 anzeigen

NETWORK 13
LDN    M2.0                 // wenn Anfangsdelay abgelaufen
U      V154.2               // wurde Bearbeitungsbit gesetzt (Meldung 3)
R      V154.2, 1            // Bearbeitungbit rücksetzen
MOVR   VD156, VD136         // bearbeitete Realzahlwert holen
MOVB   16#80, VB12          // Meldung 1 anzeigen
```

```
//------------------------------
//* Steuerung der Ventillampen *
//------------------------------

NETWORK 14      // Ventilzustände im System
LD     SM0.0                  // Sondermerker ist immer gesetzt
LPS
U      A0.3
S      A0.1, 1                //-> Ventil auf -> Lampe grün
NOT                           //-> Ventil geschossen -> Lampe aus
R      A0.1, 1
LRD
U      A2.6
S      A2.7, 1
NOT
R      A2.7, 1
LRD
U      A0.4
S      A0.2, 1
NOT
R      A0.2, 1
LRD
U      A1.0
S      A2.0, 1
NOT
R      A2.0, 1
LRD
U      E0.5
S      A2.1, 1
NOT
R      A2.1, 1
LRD
U      E0.6
S      A2.2, 1
NOT
R      A2.2, 1
LRD
U      E0.7
S      A2.3, 1
NOT
R      A2.3, 1
LRD
U      E1.0
S      A2.4, 1
NOT
R      A2.4, 1
LRD
U      E1.5
S      A3.1, 1
NOT
R      A3.1, 1
LRD
U      E1.2
S      A3.2, 1
NOT
R      A3.2, 1
LRD
U      E0.0
S      A3.3, 1
NOT
R      A3.3, 1
LRD
LD     M1.6
O      M1.4
ULD
S      A3.6, 1
NOT
```

```
R      A3.6, 1
LPP
U      A3.7
R      A0.5, 1
NOT
S      A0.5, 1

NETWORK 15      // Druckalarm
LDN    M2.0                   // wenn Anfangsdelay abgelaufen
UN     E0.1                   // Druckschalter liefern kein Signal
LDN    M2.0                   // wenn Anfangsdelay abgelaufen
UW>=   +16383, AEW16          // oder - Druck in DME-Leitung >= 3 bar
OLD
LDN    M2.0                   // wenn Anfangsdelay abgelaufen
UW>=   +16383, AEW18          // oder - Druck im Ar -Leitung >= 3 bar
OLD
LDN    M2.0                   // wenn Anfangsdelay abgelaufen
UW>=   +16383, AEW26          // oder - Druck in Bypass >= 0,5 bar
OLD
LDN    M2.0                   // wenn Anfangsdelay abgelaufen
UW>=   +16383, AEW0           // oder - Druck im Faß    >= 0,5 bar
OLD
R      A2.6, 1                //      -> Störung
S      M1.5, 1                //      -> Druckalarmmerker setzen

NETWORK 16      // Stickstoffinertisierung
LDN    E1.3                   // Schwebekörperflußmesser der Inertisierung liefert kein Signal
R      A2.6, 1                //      -> Störung

//----------------------------
//* Verhalten bei Störungen *
//----------------------------

NETWORK 17      // Störung in S7_200
LDN    A2.6                   // Störung in S7_200
LPS
R      A0.3, 2                //      -> Ventile 1- 4 schließen
R      A0.6, 4                //      -> Ventile 6-10 schließen
DISI                          //      -> alle Interruptereignisse sperren
MOVW   +0, AAW0               //      -> schließe Massenflußregler
MOVW   +0, AAW4
MOVW   +0, AAW8
MOVW   +0, AAW12
U      M1.5                   // wenn zusätzlich Druckalarm
R      A3.7, 1                //      -> Belüftung öffnen
LRD
UN     M1.3                   //      -> wenn Merker nicht gesetzt
S      A3.0, 1                //              -> Signalhupe an
LPP
R      A2.5, 1                //      -> Kreislaufpumpe aus + Lampe aus

NETWORK 18      // Reset der Alarmhupe
LD     A3.0                   // wenn Hupe an und Anwender fordert Reset der Hupe
U      E0.3
R      A3.0, 1                //      -> Hupe aus
S      M1.3, 1                //      -> setzte Resetmerker(Hupe)

NETWORK 19
LD     M1.3
TON    T37, +18000            //      -> starte Zeit

NETWORK 20
LD     T37                    // Zeit abgelaufen (30 min)
S      A3.0, 1                //      -> starte Signalhupe erneut
R      M1.3, 1                //      -> rücksetze Resetmerker

NETWORK 21      // Master-Reset
LD     E0.0                   // wenn Anwender nach Störung "Reset" macht
```

```
U      E1.5                    // und keine Störung mehr in der S7_400 vorhanden ist
S      A2.6, 1                 //      -> schalte Störung aus
JMP    0                       //      -> an den Anfang springen

//---------------------
//* Stickstoffspülung *
//---------------------

NETWORK 22      // Stickstoffspülung
LDN    M2.0                    // wenn Anfangsdelay abgelaufen
U      A2.6                    // und störungsfrei und
U      E1.2                    // Eingang gesetzt und
UN     M1.6                    // keine Störung in Kreislauf 1 und
UN     M1.4                    // keine Störung in Kreislauf 2
TON    T38, +6000              //      -> starte Zeit
S      A1.0, 1                 //      -> öffne Stickstoffventile (PV8 und 10)
R      A0.7, 1                 //      -> schließe DME-Zufuhr (PV7)
R      A1.1, 1                 //      -> schließe Ar-Zufuhr (PV9)
S      A0.3, 1                 //      -> öffne Ventile im 1.Kreislauf (PV1 und 2)
S      A3.7, 1                 //      -> schließe Entlüftung(NO-Ventil)
S      A0.6, 1                 //      -> öffne Systemzugang
S      M1.0, 1                 //      -> setze Merker, daß gespült wurde

NETWORK 23
LD     T38                     // wenn Zeit abgelaufen (10 min)
U      E1.2                    // und Eingang gesetzt
U      A2.6                    // und störungsfrei
R      A0.3, 1                 //      -> schließe Ventile im 1.Kreislauf (PV1 und 2)
S      A0.4, 1                 //      -> öffne Ventile im 2.Kreislauf (PV3 und 4)

NETWORK 24      // Stickstoffspülung beendet
LD     M1.0                    // wenn Merker gesetzt ist
UN     E1.2                    // und Spülung nicht mehr angefordert wird
U      A2.6                    // und wenn störungfrei
S      A0.3, 1                 //      -> Ventil 1 und 2 (-> Kreislauf 1) auf
R      A0.4, 1                 //      -> Ventil 3 und 4 (-> Kreislauf 2) geschlossen
S      A3.7, 1                 //      -> Ventil 5 (-> Belüftung) geschlossen (NO-Ventil)
S      A0.6, 1                 //      -> Ventil 6 (-> Systemzugang) auf + Lampe an
S      A0.7, 1                 //      -> Ventil 7 (-> DME-Zuleitung) auf + Lampe an
R      A1.0, 1                 //      -> Ventil 8 und 10 (-> N-Zufuhr) geschlossen
S      A1.1, 1                 //      -> Ventil 9 (-> Ar-Zufuhr) auf + Lampe an
R      M1.0, 1                 //      -> Rücksetzen des Merkers

//--------------
//* Faßspülung *
//--------------

NETWORK 25      // Faßspülung
LDN    M2.0                    // wenn Anfangsdelay abgelaufen
UR=    VD136, 1.000000         // wenn Spülung über TD200 angefordert wird und
LDN    A2.6                    // wenn Störung aufgetreten ist + Master-Reset angefordert
U      E0.0
O      A2.6                    //      oder wenn keine Störung vorhanden ist
ULD
S      A0.3, 2                 //      -> öffne PV1 - PV4
R      A3.7, 1                 //      -> öffne PV5 (NO-Ventil)
R      A0.6, 1                 //      -> schließe PV6
S      M1.7, 1                 //      -> setze Faßspülmerker
DISI                           //      -> alle Interruptereignisse sperren
MOVW   +16383, AAW0            //      -> öffne MFC1 - MFC4 auf "halben Range"
MOVW   +16383, AAW4
MOVW   +16383, AAW8
MOVW   +16383, AAW12

NETWORK 26
LD     M1.7                    // wenn Faßspülmerker gesetzt
UR=    VD136, 0.0000000        // und wenn keine Spülung mehr angefordert wird
S      M1.1, 1                 //      -> gebe Anfangswerte frei
```

```
JMP    0                      //      -> an den Anfang springen

//-----------------------------------------
//* Soll-Ist-Vergleich der Massenflußregler *
//-----------------------------------------

NETWORK 27      // Ar-Fluß-Abweichungstoleranz
LD     A2.6                   // wenn störungsfrei:
UN     M2.0                   // und wenn Anfangsdelay abgelaufen
MOVW   VW222, VW204           // Soll-Wert-Ar in VW204 und VW206
MOVW   VW222, VW206           // hier: ABWEICHUNGSTOLERANZ = +/- 164
+I     +164, VW204
-I     +164, VW206            //      -> entspr.: +/- 10 ml

NETWORK 28      // Ar-Fluß -> wenn PV1 und 2 (Ar) offen und störungfrei:
LD     A0.3
U      A2.6
UN     M2.0                   // und wenn Anfangsdelay abgelaufen
LDW>=  VW206, AEW2            // Vergleich:(Sollwert-Toleranz)>=Istwert(MFC2)->Fehler
OW<=   VW204, AEW2            // Vergleich:(Sollwert+Toleranz)<=Istwert(MFC2)->Fehler
ULD                           // wenn Fehler:
R      A0.3, 1                //      -> schließe Ventil 1 und 2
S      M1.6, 1                //      -> setze Merker, daß Fehler bei 1/2
S      A0.4, 1                //      -> öffne Ventil 3 und 4
LDW>=  VW206, AEW4
OW<=   VW204, AEW4            //      -> überprüfe Abweichung bei MFC2:
ULD
R      A2.6, 1                //      -> wenn Abweichung:-> Störung
S      M1.4, 1                //      -> setze Merker, daß Fehler bei 3/4

NETWORK 29      // Ar-Fluß -> wenn PV3 und 4 (Ar) offen und störungfrei:
LD     A0.4
U      A2.6
UN     M2.0                   // und wenn Anfangsdelay abgelaufen
LDW>=  VW206, AEW4            // Vergleich:(Sollwert-Toleranz)>=Istwert(MFC4)->Fehler
OW<=   VW204, AEW4            // Vergleich:(Sollwert+Toleranz)<=Istwert(MFC4)->Fehler
ULD                           // wenn Fehler:
R      A0.4, 1                //      -> schließe Ventil 3 und 4
S      M1.4, 1                //      -> setze Merker, daß Fehler bei 3/4
S      A0.3, 1                //      -> öffne Ventil 1 und 2
LDW>=  VW206, AEW2
OW<=   VW204, AEW2            //      -> überprüfe Abweichung bei MFC Nr.1:
ULD
R      A2.6, 1                //      -> wenn Abweichung:-> Störung
S      M1.6, 1                //      -> setze Merker, daß Fehler bei 1/2

NETWORK 30      // DME-Fluß-Abweichungstoleranz
LD     A2.6                   // wenn störungsfrei:
UN     M2.0                   // und wenn Anfangsdelay abgelaufen
MOVW   VW220, VW208           // Soll-Wert-DME in VW208 und VW210
MOVW   VW220, VW210           // hier: ABWEICHUNGSTOLERANZ = +/- 164
+I     +164, VW208            //         -> entspr.: +/- 10 ml
-I     +164, VW210

NETWORK 31      // DME-Fluß -> wenn PV1 (DME) und 2 offen und störungfrei:
LD     A0.3
U      A2.6
UN     M2.0                   // und wenn Anfangsdelay abgelaufen
LDW>=  VW210, AEW8            // Vergleich:(Sollwert-Toleranz)>=Istwert(MFC1)->Fehler
OW<=   VW208, AEW8            // Vergleich:(Sollwert+Toleranz)<=Istwert(MFC1)->Fehler
ULD                           // wenn Fehler:
R      A0.3, 1                //      -> schließe Ventil 1 und 2
S      M1.6, 1                //      -> setze Merker, daß Fehler bei 1/2
S      A0.4, 1                //      -> öffne Ventil 3 und 4
LDW>=  VW210, AEW10
OW<=   VW208, AEW10           //      -> überprüfe Abweichung bei MFC3:
ULD
R      A2.6, 1                //      -> wenn Abweichung:-> Störung
```

```
S      M1.4, 1                  //      -> setze Merker, daß Fehler bei 3/4

NETWORK 32      // DME-Fluß -> wenn PV3 (DME) und 4 offen und störungfrei:
LD     A0.4
U      A2.6
UN     M2.0                     // und wenn Anfangsdelay abgelaufen
LDW>=  VW210, AEW10             // Vergleich:(Sollwert-Toleranz)>=Istwert(MFC3)-> Fehler
OW<=   VW208, AEW10             // Vergleich:(Sollwert+Toleranz)<=Istwert(MFC3)-> Fehler
ULD                             // wenn Fehler:
R      A0.4, 1                  //      -> schließe Ventil 3 und 4
S      M1.4, 1                  //      -> setze Merker, daß Fehler bei 3/4
S      A0.3, 1                  //      -> öffne Ventil 1 und 2
LDW>=  VW210, AEW8
OW<=   VW208, AEW8              //      -> überprüfe Abweichung bei MFC1:
ULD
R      A2.6, 1                  //      -> wenn Abweichung:-> Störung
S      M1.6, 1                  //      -> setze Merker, daß Fehler bei 1/2

NETWORK 33      // Gesamtfluß-Abweichungstoleranz
LD     A2.6                     // wenn störungsfrei:
UN     M2.0                     // und wenn Anfangsdelay abgelaufen
MOVW   AEW12, VW212             // Gesamtfluß in VW212 und VW214
MOVW   AEW12, VW214             // hier: ABWEICHUNGSTOLERANZ = +/- 150
+I     +330, VW212
-I     +330, VW214              //         -> entspr.: +/- 10 ml

NETWORK 34      // wenn Ventil 1 und 2 offen und störungfrei:
LD     A0.3
U      A2.6
UN     M2.0                     // und wenn Anfangsdelay abgelaufen
MOVW   AEW8, VW216
+I     AEW2, VW216              // addiere entsprechende Flüsse
LDW>=  VW214, VW216
OW<=   VW212, VW216             // bei Abweichung zu Gesamtfluß:
ULD
R      A2.6, 1                  //      -> Störung

NETWORK 35      // wenn Ventil 3 und 4 offen und störungfrei:
LD     A0.4
U      A2.6
UN     M2.0                     // und wenn Anfangsdelay abgelaufen
MOVW   AEW10, VW218
+I     AEW4, VW218              // addiere entsprechende Flüsse
LDW>=  VW214, VW218
OW<=   VW212, VW218             // bei Abweichung zu Gesamtfluß:
ULD
R      A2.6, 1                  //      -> Störung

//-------------------
//* Anzeigedisplays *
//-------------------

NETWORK 36      // Fraction (= Anteil von DME)
MOVW   AC3, AAW16               // Ganze Zahl in Analogausgang schreiben

NETWORK 37
MEND
//_________________________________________________________________________
//
// Unterprogramme:
// --------------

//------------------
//* PID - Regelung *
//------------------
// Geregelt wird auf den Druck im Faß. Aus der Abweichung vom Solldruck wird ein Sollfluß bestimmt.
// Es gilt: Strom DME   = Sollwert(PID)*[Mischverh./100]
//          Strom Ar    = [(100-Mischverh.)/Mischverh.]*Sollwert(PID)*Kalibrationsfaktor
```

```
//                      = [(100-Mischverh.)/(Mischverh.)^2]*Sollwert(DME)*Kalibrationsfaktor*100

NETWORK 38      // -- Unterprogramm für PID - Initialisierung
SBR    0

NETWORK 39      // Umwandeln Sollwert+Laden der Tabellenwerte+Interrupt einr.
LD     A2.6                // wenn störungsfrei: -> Soll-Druck(Analog->16 Bit) in normalisierten Wert
XORD   AC0, AC0            // Akkumulator löschen
MOVW   +25013, AC0         // Analogwert in Akkumulator speichern (hier: SOLLDRUCK = 0,3 bar)
DTR    AC0, AC0            // Ganze Zahl in Realzahl umwandeln
/R     64000.00, AC0       // Wert im Akkumulator normalisieren
+R     0.5000000, AC0      // Versatz für einen Wert auf einen Bereich von 0 bis 1
MOVR   AC0, VD104          // Normalisierten Wert in Table speichern
MOVR   0.2500000, VD112    // hier: VERSTÄRKUNG = 0,25
MOVR   0.1000000, VD116    // hier: ABTASTZEIT = 0,1 sec
MOVR   30.00000, VD120     // hier: INTEGRALZEIT = 30 min
MOVR   0.0000000, VD124    // hier: DIFFERENTIALZEIT = aus
MOVB   100, SMB34          // hier: INTERRUPTZEIT = 100 msec (Intervall für Interrupt 0)
ATCH   0, 10            // Aufruf eines zeitgesteuerten Interrupts einrichten (Operation PID ausführen)
ENI                        // Interrupts freigeben

NETWORK 40      // -- Ende Unterprogramm
RET

NETWORK 41      // -- Interrupt (bis Network 37)
INT    0

NETWORK 42      // Umwandeln des Istwertes (Ist-Druck) (Analog->16 Bit) in normalisierten Wert
LD     A2.6                 // wenn störungsfrei:
XORD   AC2, AC2             // Akkumulator löschen
MOVW   AEW0, AC2            // Analogwert in Akkumulator speichern
DTR    AC2, AC2             // Ganze Zahl in Realzahl umwandeln
/R     64000.00, AC2        // Wert im Akkumulator normalisieren
+R     0.5000000, AC2       // Versatz für einen Wert auf einen Bereich von 0 bis 1
MOVR   AC2, VD100           // Normalisierten Wert in Table speichern

NETWORK 43      // PID - Automatik
LD     A2.6                 // wenn störungsfrei:
PID    VB100, 0             //               -> Operation PID aufrufen

NETWORK 44      // Umwandeln der Stellgröße (normalisierte Realzahl) in Analogwert (Massenfluß)
LD     A2.6                 // wenn störungsfrei:
LPS
MOVR   VD108, AC2           // Stellgröße in Akkumulator übertragen
-R     0.5000000, AC2
*R     64000.00, AC2        // Wert in Akkumulator skalieren
TRUNC  AC2, AC2             // Realzahl in ganze Zahl umwandeln
MUL    AC3, AC2             // Strom DME    = Sollwert(PID)*[Mischverh./100]
DIV    +100, AC2
U      A0.3                 // je nach Ventilöffnung regelt MFC1 oder MFC3 den Fluß des DME
MOVW   AC2, AAW0            // Ganze Zahl in Analogausgang schreiben
LRD
U      A0.4
MOVW   AC2, AAW8
LRD
MOVW   AC2, VW220
LRD                         // Bestimmung des Ar-Flusses aus dem berechneten DME-Fluß
DTR    AC2, AC2             // DME-Soll-Fluß in Realzahl umwandeln
LRD
*R     50.00000, AC2        // Berücksichtigung des KALIBRATIONFAKTORS = 0,5
LRD
MOVR   AC3, VD200           // Eingabe des gewünschten Mischungsverhälnisses über TD200
-R     100.0000, VD200
LRD
*R     -1.000000, VD200     // Strom Ar=[(100-Mischverh.)/Mischverh.]*Sollwert(PID)*Kalibrationsfaktor
LRD                         // = [(100-Mischverh.)/(Mischverh.)^2]*Sollwert(DME)*Kalibrationsfaktor*100
/R     AC3, VD200
/R     AC3, VD200
```

```
LRD
*R     VD200, AC2
LRD
TRUNC  AC2, AC2             // Ar-Soll-Fluß in ganze Zahl (32 Bit) wandeln
LRD
U      A0.3                 // je nach Ventilöffnung regelt MFC2 oder MFC4 den Ar-Fluß
MOVW   AC2, AAW4            // Ganze Zahl in Analogausgang schreiben
LRD
U      A0.4
MOVW   AC2, AAW12
LPP
MOVW   AC2, VW222

NETWORK 45
LD     A2.6                 // wenn störungsfrei
LPS
U      A0.3                 // und Kreislauf 1 geöffnet
MOVW   +0, AAW8             //                       -> schließe MFCs 3 und 4
MOVW   +0, AAW12
LPP
U      A0.4                 // und Kreislauf 2 geöffnet
MOVW   +0, AAW0             //                       -> schließe MFCs 1 und 2
MOVW   +0, AAW4

NETWORK 46      // -- Ende Interrupt
RETI
----------------------------------------
```

Anhang C

Programm zur Datenauslese des Gassystems

Im folgenden ist das C++Programm, das die Daten der S7-400 ausliest und auf die Festplatte des Computers schreibt aufgeführt[1]. Abbildung C.1 enthält das Programm zur Verdeutlichung als Schematikblock.

```
-----------------------------------------
#include <ptoc.h>
#include <datetime.h>
#include <wfc.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

void copy_data()
 {
 FILE *dat_ever;
 FILE *dat_ein;
 FILE *dat_new;
 varying_string<20> newfile;
 string response;
 int i,izeit;
 string zeitp;
 bool bl;
 assign(dat_ein,"sps_data.dat");
 assign(dat_ever,"sps_data_long.dat");
 newfile = filedt();
 assign(dat_new,newfile);
 reset(dat_ein)
 rewrite(dat_new);
 while (! eof(dat_ein))
    {
     dat_ein  >> response >> NL;
```

[1]Programm geschrieben von H.-B. Dreis, Physikalisches Institut, Universität Heidelberg.

```
     dat_new  << response << NL;
     dat_ever << response << NL;
    }
 close(dat_ein);
 close(dat_new);
 close(dat_ever);
 } /*copy_data*/

void get_data()
 {
  FILE *dat_aus;
  FILE *dat_ein;
  varying_string<20> newfile;
  string response;
  int i,izeit;
  string zeitp;
  bool bl;
  assign(dat_ein,"sps_data.dat");
  assign(dat_aus,"sps_data.dat");
  reset(dat_ein);
  i = 0;
  CSerialFile serial_port;
  while (! eof(dat_ein))
    {
    dat_ein >> response >> NL;
    if (length(response) > 0)  i += 1;
    }
   close(dat_ein);
   if (i <= 50000)
     {
     if ( serial_port.Open("COM1:9600,n,8,1")  != TRUE
        {
        return(EXIT SUCCESS );
        }
      append(dat_aus);
      while (~ i > 50000)
        {
        bl = serial_port.WaitForstring("r", 0.000001 , &response)
        if ( response.getlength() > 2)
          {
           for(i = 1; i <= response.getlength(); i ++)
            if (response[i] == 'B')  response[i] = '\11';
           izeit = idt();
           str(izeit, zeitp)
           dat_aus << zeitp+response << NL;
           i += 1;
          }
        }
```

```
        close(dat_aus);
     }
        copy_data;
 } /*get_data*/

int main()
 {  /*program*/
  screensize.x = 100;
  screensize.y = 256;
  while (true) get_data();
  return EXIT_SUCCESS;
 }  /*program*/
-----------------------------------------
```

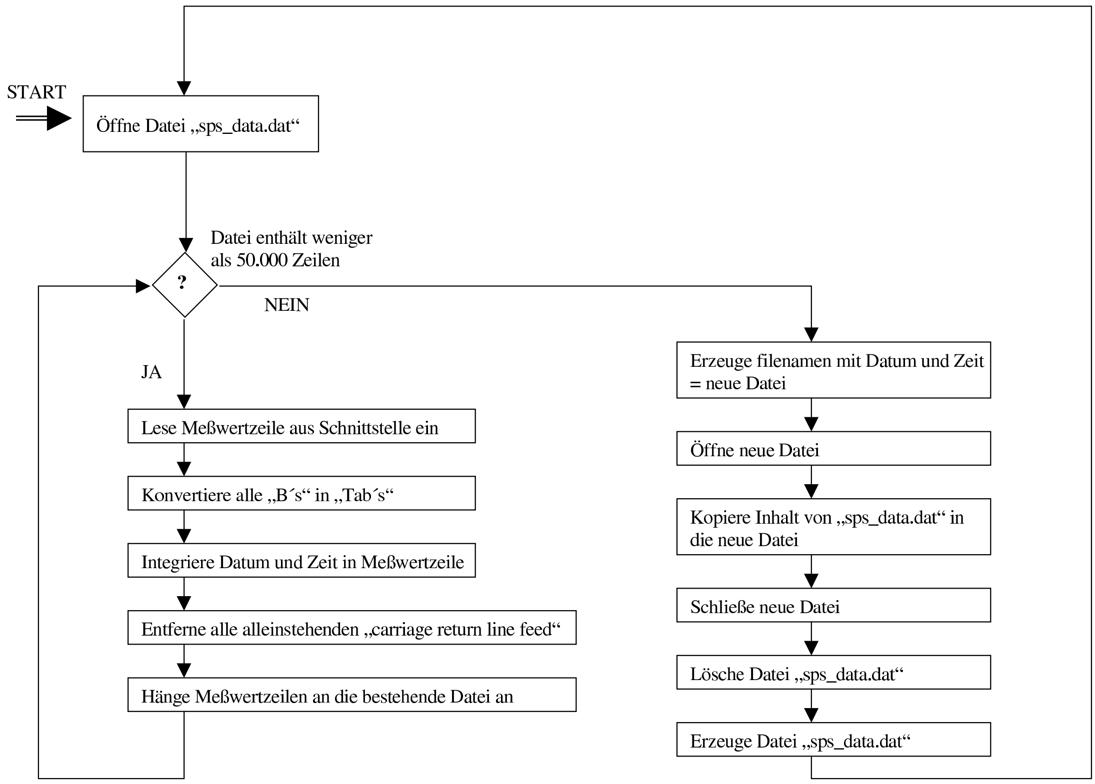

Abb. C.1: Schematische Darstellung des Programms der Datennahme.
Die im Schema enthaltene Ersetzung aller "B's" in "Tabs" resultiert aus der Tatsache, daß die SPS die unterschiedlichen Meßwerte bei der Übertragung durch B's trennt, das Programm zur Auswertung der Daten aber Tabs zwischen einzelnen Werten erwartet.

Anhang D

Aufstellung der verwendeten Hardwarekomponenten für das Gassystem

Es folgt eine Zusammenstellung der für das Gassystem ausgewählten Hardware bzw. der Hersteller dieser Komponenten:

- **PID-Regler** der Firma ABB.
  Produktbezeichnung: Commander 100

- **Kreislaufpumpe** der Firma Rietschle.
  Produktbezeichnung: VTE PICOLINO 3

- **Massenflußregler** von Hastings.
  Produktbezeichnung: Model HFC-202

- **Druckdosen** der Firma SETRA.

  Produktbezeichnung: Model C267
  267120-38-SCH für ± 100 PA Meßbereich
  267120-42-SCH für ± 500 PA Meßbereich
  267120-44-SCH für ±1000 PA Meßbereich

- **Drucksensoren** der Firma Kobold.

  Produktbezeichnung: 3249.074.092 für 0-6 bar Meßbereich
  3249.069.092 für 0-1 bar Meßbereich

- **Druckschalter** der Firma Kobold.

  Produktbezeichnung: DNMV1 für 0,2 - 1,6 bar Meßbereich
  DNMV6 für 0,0 - 6,0 bar Meßbereich

- **Pneumatikventile** der Firma Parker.

Produktbezeichnung: M6A-P4K1-11AO-SSV für normally-open Ventile
M6A-P4K1-11AC-SSV für normally-closed Ventile

- **Ansteuerungen für Pneumatikventile** der Firma Crouzet.
  Produktbezeichnung: 81513100

- **Schwebekörperflußmesser** der Firma Bailey Fischer & Porter.
  Produktbezeichnung: D10A1197D/9809N1746

- **Überströmventile** der Firma Parker.

  Produktbezeichnung: M6A-CO4L-25-KZ-SS für 25 psi Öffnungsdruck (= 1,75 bar)
  M6A-CO4L-75-KZ-SS für 75 psi Öffnungsdruck (= 5,25 bar)

- **Handventile** der Firma Parker.
  Produktbezeichnung: M6A-P4R-SSV

- **Speicherprogrammierbare Steuerung** der Firma Siemens.

  Produktbezeichnung: S7-400 für die Steuerung der Gasregelung
  S7-200 für die Steuerung der Gasmischung

- **Spannungsversorgung der Massenflußregler** der Firma VERO.
  Produktbezeichnung: BIVOLT GK30-2

- **Wellschläuche** der Firma Hydra [Firma Paul Martin (Witzenmann-Gruppe)].
  Produktbezeichnung: RS 331S00

- **Verschraubungen** der Firma Parker.

- **Edelstahlrohre** der Firma Dockweiler.

Abbildungsverzeichnis

Literaturverzeichnis

[ABB] ABB - *COMMANDER 100 Universal Process Controller / User Guide*, 1996

[CASELLA] R. Casella - *Phys. Rev. Lett. 34*, 1125, 1975

[CHRISTENSON] J.H. Christenson, J.W. Cronin, V.L. Fitch, R. Turlay - *Phys. Rev. Lett. 13*, 138-140, 1964

[KOBAYASHI] M. Kobayashi, T. Maskawa - *Prog. Theor. Phys. 49*, 652, 1973

[DESY] DESY - *Sicherheitsvorschriften für den Umgang mit Gasen*, Interner Bericht DESY D5-93-01, Januar 1993

[DESIGN] H.-B. Dreis, *Designvorschlag: Gas-System*, 18.8.97, Kapitel 2

[DREIS] H.-B. Dreis, *Interne Mitteilung*

[ELRAD] ELRAD - *Magazin für Elektronik und technische Rechneranwendungen*, Ausgabe 11/95, Seite 56 - 62

[HASTINGS] TELEDYNE BROWN ENGINEERING - *Instruction Manual Hastings Model Mass Flowcontrollers HFC-202 / HFC-203*, September 1994

[HERA B 1] HERA-B - *Proposal*, DESY-PRC, Februar 1994

[HERA B 2] HERA-B - *Design Report*, DESY-PRC, Januar 1995

[HUETTE] HÜTTE - *Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*, 29. Auflage, Springer-Verlag

[HYDRA] HYDRA Metallschläuche - *Das Handbuch der Metallschläuche*, Ausgabe 1998/1, Seite 348 - 361, Labhard Verlag Konstanz

[IMT] Industrie-Messtechnik - *Betriebsanleitung Drucksensoren*, 1997

[KOBOLD] KOBOLD - *Bedienungsanleitung für Druckschalter / Type SCH-...*, 1997

[PARKER 1] PARKER - *P Series Bellows Valve / Installation Instruction INI-212*, 1992

[PARKER 2] - *CO Series Check Valve / Installation Instruction INI-222*, 1997

[REINSCH] W. Reinsch (Sicherheitsverantwortlicher für HERA-B) - *Besprechungsprotokoll vom 16.11.98*

[SETRA] KLAUS SCHAEFER Gesellschaft für Verfahrenstechnik, Langen - *Setra Model 267 Specifications*, 1997

[SIEMENS 1] SIEMENS - *SIMATIC Automatisierungssystem S7-400, M7-400 / Referenzhandbuch Baugruppendaten*, Bestellnr.: 6ES7498-8AA01-8AA0, 1996

[SIEMENS 2] SIEMENS - *SIMATIC Automatisierungssystem S7-400, M7-400 / Installationshandbuch Aufbauen*, Bestellnr.: 6ES7498-8AA01-8AA0, 1997

[SIEMENS 3] SIEMENS - *SIMATIC Software / Benutzerhandbuch Basissoftware für S7 und M7 / STEP 7*, Bestellnr.: 6ES7810-4CA02-8AA0, 1996

[SIEMENS 4] SIEMENS - *SIMATIC Software / Handbuch AWL für S7-300/400 Bausteine programmieren*, Bestellnr.: 6ES7810-4CA02-8AR0, 1996

[SIEMENS 5] SIEMENS - *SIMATIC Software / Handbuch KOP für S7-300/400 Bausteine programmieren*, Bestellnr.: 6ES7810-4CA02-8AR0, 1996

[SIEMENS 6] SIEMENS - *SIMATIC Software / Handbuch FUP für S7-300/400 Bausteine programmieren*, Bestellnr.: 6ES7810-4CA02-8AR0, 1996

[SIEMENS 7] SIEMENS - *SIMATIC Ladbarer Treiber CP 441-2, MODBUS Protokoll, S7 ist Master*, Bestellnr.: 6ES7870-1AA00-0YA0, 1997

[SIEMENS 8] SIEMENS - *SIMATIC Punkt-zu-Punkt-Kopplung CP 441/ Handbuch Aufbauen und Parametrieren*, Bestellnr.: EWA4NEB7306000-01b, 1996

[SIEMENS 9] SIEMENS - *SIMATIC NET / Manual NCM S7 for Industrial Ethernet*, Bestellnr.: C79000-G8976-C101, Release 03, 1997

[SIEMENS 10] SIEMENS - *SIMATIC NET / Primer NCM S7 for Industrial Ethernet*, Bestellnr.: C79000-G8976-C095, Release 02, 1997

[SIEMENS 11] SIEMENS - *SIMATIC Automatisierungssystem S7-200 / Systemhandbuch*, Bestellnr.: 6ES7298-8FA00-8AH0, 1997

[SIEMENS 12] SIEMENS - *SIMATIC Benutzerhandbuch Textdisplay TD200*, Bestellnr.: 6ES7272-0AA00-8AA0 , 1995

[SCHUBERT] K.R. Schubert et al. - *Phys. Lett. 31B*, 662, 1970

[VISBECK] S. Visbeck - *Untersuchungen von Prototypen der Mikrostreifen-Gaskammern (MSGC) des inneren Spurkammersystems des HERA-B Experimentes*, Diplomarbeit, Kapitel 6, Seite 36, September 1996

[WU] C.S. Wu et al. - *Phys. Rev. 105*, 48, 1957

Herzlichen Dank

Abschließend möchte ich allen danken, die mir das Erstellen dieser Arbeit möglich gemacht haben.

Insbesondere sind das:

Herr Prof. F. Eisele
für die Bereitstellung des interessanten Themas und die gute Bereuung meiner Arbeit.

Herr Prof. P. Bock
für die Übernahme der Zweitkorrektur.

Hans-Bernd
für die Beantwortung aller meiner Fragen zu jeder Zeit. Außerdem für viele interessante - auch nicht physikalische - Gespräche und für den Spaß, den mir die Diplomarbeit jederzeit gemacht hat.
Danke auch für die Bereitstellung einiger Plots und für das Korrekturlesen meiner Arbeit.

Malte
für seine immer vorhandenen offenen Ohren bei auftretenden Problemen. Für die zwischenzeitlich in Anspruch genommenen Taxidienste und für die Gespräche über alles, was so interessiert...(das war's vom Carsten).

Katharina für ihre Hilfe bei der "Internationalisierung" meiner Arbeit.

Die Fotografen (Hans-Bernd und Marcus) für den Einsatz ihrer Fähigkeiten.

Die Korrekturleser für die Überprüfung meiner "Ortokrafie".

Die gesamte Arbeitsgruppe für die gute Zusammenarbeit.

Die Werkstattangehörigen (insbesondere Thomas F. und Christian R.) für ihre Hilfe.

Martin,
meinem ständigen Mitstreiter bei dem Versuch, sich in der Welt der Physik zurechtzufinden.
Nach fünf Jahren heißt es nun: "Tschüß Martin, viel Glück in Wasserburg !"

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern und meiner Freundin Andrea für ihre Unterstützung bedanken.

Erklärung:

Ich versichere, daß ich diese Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den 19.01.99

....

Carsten Heiß