

# Aufbau, Kalibration und Anwendung einer Messapparatur zur Überwachung des Gasdrucks in den CMS-Myonkammern

von

Michael Sowa

Diplomarbeit in Physik

vorgelegt der

Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

im Januar 2003

angefertigt im

III. Physikalischen Institut A

Prof. Dr. Thomas Hebbeker  
(Erstgutachter)

Prof. Dr. Manfred Tonutti  
(Zweitgutachter)





# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>5</b>  |
| <b>2 Suche nach neuen Teilchen</b>   | <b>7</b>  |
| 2.1 Wonach wollen wir suchen?  | 7         |
| 2.1.1 Das Standardmodell   | 7         |
| 2.1.2 Erweiterungen des Standardmodells  | 9         |
| 2.2 Wie wollen wir nach den neuen Teilchen suchen?                                 | 10        |
| 2.2.1 LHC  | 10        |
| 2.2.2 CMS  | 12        |
| 2.2.3 Das Myonsystem   | 14        |
| 2.2.4 Die Myonkammern  | 14        |
| 2.2.5 Die Driftgeschwindigkeit   | 17        |
| 2.3 Bau und Tests der CMS-Myonkammern  | 17        |
| <b>3 Die Drucksensoren für die CMS-Myonkammern</b>                                 | <b>21</b> |
| 3.1 Wozu braucht man Drucksensoren?  | 21        |
| 3.1.1 Gaseigenschaften und Gasverteilung des Myonsystems                           | 22        |
| 3.1.2 Die Drucksensoren  | 22        |
| 3.2 Der Kalibrationsvorgang  | 26        |
| 3.2.1 Der Zweck der Kalibration  | 26        |
| 3.2.2 Verstärkung und Digitalisierung der Ausgangssignale                          | 26        |
| 3.2.3 Prinzip und Durchführung der Kalibration                                     | 26        |
| 3.2.4 Auslese, Auswertung und Verwendung der Daten                                 | 27        |
| 3.2.4.1 Referenzdruck  | 27        |
| 3.2.4.2 Ausgangssignale der Drucksensoren (digits)                                 | 29        |
| 3.2.4.3 Datenerfassung und -speicherung  | 29        |
| 3.2.4.4 Ergebnisse   | 29        |
| 3.2.4.5 Verwendung der Drucksensoren –<br>das portable 4-fach-Manometer <i>PG4</i> | 31        |
| 3.3 Auflösung der Messkurve und Genauigkeit der Messung                            | 32        |
| 3.4 Drucksensoren unter LHC-Bedingungen  | 34        |
| 3.4.1 Charakteristik der nicht stabilisierten Sensoren                             | 35        |
| 3.4.2 Die bestrahlten Sensoren   | 37        |
| 3.4.3 Sensoren im äußeren Magnetfeld   | 41        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4 Gastests an den CMS-Myonkammern</b>  | <b>47</b> |
| 4.1 Dichtigkeit der Myonkammern   | 47        |
| 4.2 Theorie des Leckvorgangs  | 48        |
| 4.2.1 Ausströmen von Gasen aus Behältern  | 48        |
| 4.2.2 Die Zeitkonstante   | 49        |
| 4.2.3 Die Leckrate  | 50        |
| 4.3 Dichtigkeitstests   | 51        |
| 4.3.1 Wann wird ein Gasdichtigkeitstest benötigt?   | 52        |
| 4.3.2 Durchführung eines Gasdichtigkeitstests   | 53        |
| 4.3.3 Die Messergebnisse  | 54        |
| 4.4 Validität der Messergebnisse  | 55        |
| 4.4.1 Die Messergebnisse und die Zeitkonstante  | 55        |
| 4.4.2 Reproduzierbarkeit der Messergebnisse<br>und die Zeitkonstante bei verschiedenen Anfangsdruckwerten | 60        |
| 4.5 Drucktests  | 61        |
| <b>5 Die Impedanz der CMS-Myonkammern</b>   | <b>63</b> |
| 5.1 Methode und erste Messungen   | 63        |
| 5.2 Messungen mit höherer Auflösung   | 65        |
| 5.3 Folgerungen für den Betrieb der Kammern   | 66        |
| <b>6 Die Reinheit des Gases</b>   | <b>71</b> |
| <b>7 Zusammenfassung</b>  | <b>75</b> |
| <b>Anhang</b>   | <b>77</b> |
| A Die Software „ <i>Gas Calibration v1.1</i> “  | 77        |
| B Die Software „ <i>Gas Tightness v1.2</i> “  | 80        |
| <b>Quellennachweis</b>  | <b>85</b> |
| <b>Danksagung</b>   | <b>87</b> |



# Kapitel 1

## Einleitung

*„Nur durch Übereinkunft gibt es Süßes, Bitteres, Warmes, Kaltes und Farbiges, in Wirklichkeit gibt es nur Atome und das Leere“ [1].*

Demokrit drückte bereits vor fast zweieinhalb Jahrtausenden die Hoffnung aus, die Vielfalt an unseren Sinnesempfindungen durch unteilbare Materieteilchen möglichst gut zu erklären und zu verstehen. Dies kann man immer noch als Leitgedanken der heutigen Elementarteilchenphysik gelten lassen.

Auf die Jahrhunderte vor Christus eingeführte Idee wurde im Laufe der Zeit einmal mehr, einmal weniger zurückgegriffen. Die bedeutsamste Entfaltung des Atomismus und dessen Entwicklung zu einer Naturwissenschaft erlebte man in den letzten zwei Jahrhunderten. Die Atomhypothese wurde zum Erfolg durch die Arbeiten von Maxwell, Boltzmann und Gibbs. Im zwanzigsten Jahrhundert hat die Elementarteilchenphysik eine rasante Entwicklung erfahren. Als wichtige Meilensteine seien hier die Arbeiten von Thomson (Entdeckung des Elektrons), Rutherford (Entdeckung der Substruktur der Atome: Kern und Elektronenhülle), Bohr, Heisenberg, Pauli, Dirac (Entwicklung der Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie) und schließlich die Beiträge von Glashow, Salam, Ward, Weinberg, Gell-Mann, Fritsch und Zweig (Formulierung des modernen Standardmodells der Elementarteilchenphysik) erwähnt.

Das Standardmodell bildet heute die Grundlage für unser Verständnis der Elementarteilchenphysik. Es wurde an allen modernen Teilchenbeschleunigern, zuletzt beim Tevatron am Fermilab bei Chicago/USA bzw. beim LEP am CERN bei Genf/Schweiz mehrfach getestet und bestätigt. Basierend auf der speziellen Relativitätstheorie und Quantenmechanik beschreibt es die Naturgesetze mit Hilfe der zwölf elementaren Teilchen (6 Quarks und 6 Leptonen) und drei Wechselwirkungen zwischen ihnen (starke, elektromagnetische und schwache Wechselwirkung).

Allerdings sind wir heutzutage immer noch mit offenen Fragen konfrontiert. So wissen wir nicht, ob es möglich ist, die Massen der Teilchen theoretisch zu bestimmen, ob die bekannten Quarks und Leptonen tatsächlich elementar sind, ob es uns gelingt, die neuen theoretischen Ansätze wie Einheitliche Theorien aller Wechselwirkungen, Supersymmetrie oder Superstringtheorien experimentell zu bestätigen. Mit dem Bau eines neuen Ringbeschleunigers LHC im europäischen Zentrum der Kernforschung CERN und mit der Durchführung der Experimente an seinen vier großen Detektoren ALICE, ATLAS, CMS, und LHC-B erhofft man sich, die Naturgesetze tiefer zu erforschen, und somit wenigstens einen Teil der noch nicht gelösten Probleme der Teilchenphysik zu klären.

An einem dieser Experimente (CMS) beteiligt sich das III. Physikalische Institut A der RWTH Aachen. Hier werden speziell für das Myonsystem Driftkammern (Myonkammern) hergestellt und getes-

## 1. EINLEITUNG

tet. Es handelt sich dabei um mehrere, parallel zueinander positionierte, gasgefüllte Driftzellen, die in jeweils vier Schichten eine Superlage, und diese wiederum zu je drei eine Kammer bilden.

Da neben der angelegten Hochspannung auch die Gaszusammensetzung und der Gasdruck die Driftgeschwindigkeit beeinflussen kann, sollte untersucht werden, wie diese Größen kontrolliert werden können. Nicht zuletzt wird auch auf die Relevanz des Gasdrucks für die Sicherheit der Kammern hingewiesen. In der vorliegenden Arbeit werden speziell die mit den Gasangelegenheiten verbundenen Aufgaben dargestellt.

Zunächst wird die Auswahl und Verwendbarkeit der Drucksensoren überprüft. Dafür wurde nach einer geeigneten Kalibrationsmethode und deren Auswertung gesucht. Nachdem die Sensoren kalibriert wurden, konnten sie für weitere Gasdrucktests eingesetzt werden.

Es wurden eine Reihe von Gasdichtigkeitsmessungen an einzelnen Superlagen bzw. kompletten Myonkammern vorgenommen. Dafür ist ein Programm entwickelt worden, das die Überwachung und eine weitere Auswertung des zeitlichen Druckabfalls ermöglicht. Als Maß für die quantitativen Aussagen über die Dichtigkeit einer Superlage oder einer Kammer wird hier die Zeitkonstante des Druckabfalls eingesetzt und einer theoretischen Analyse unterzogen.

Um den Druckabfall in den verschiedenen, mit Ar/CO<sub>2</sub>-Gas gespülten Kammerlagen des CMS-Myondetektors zu verstehen, wurden entsprechende Messungen der Impedanz (d.h. des Druckabfalls pro Durchflussrate) vorgenommen.

Von Wichtigkeit ist auch die Frage nach der richtigen Gaszusammensetzung in den Kammern. Zu diesem Zweck wurde der Sauerstoffgehalt in den mit Gas gespülten Superlagen gemessen.

## Kapitel 2

# Suche nach neuen Teilchen

### 2.1 Wonach wollen wir suchen?<sup>1</sup>

#### 2.1.1 Das Standardmodell

Das heute gültige Standardmodell beschreibt die Physik der Elementarteilchen und der fundamentalen Wechselwirkungen zwischen ihnen. Seine Gültigkeit wurde durch eine Reihe präziser Tests bestätigt.

In diesem theoretischen Modell werden die Grundbausteine der Materie in zwei Klassen, Leptonen und Quarks, unterteilt (Tabelle 2.1).

Innerhalb der Leptonen unterscheidet man die Neutrinos, deren Ruhemasse gleich Null angenommen wird<sup>2</sup>, und deren Ladung Null ist, sowie das massive Elektron, Myon und Tauon, jeweils mit Ladung  $-1$ . Den sechs Quarks, die verschiedene Massen haben, werden zur Kennzeichnung verschiedene Flavours (up, down, charm, strange, top und bottom) zugeschrieben. Innerhalb eines Quarkdubletts besitzen die „oberen“ Quarks Ladung  $+2/3$ , die „unteren“ Quarks Ladung  $-1/3$ . Zu jedem Lepton und Quark existiert das entsprechende Antiteilchen mit genau gleicher Masse und entgegengesetzter Ladung. Leptonen wechselwirken schwach, die geladenen Leptonen können außerdem an elektromagnetischer Wechselwirkung teilnehmen. Die Quarks zeichnen sich dadurch aus, dass sie imstande sind, außer schwach und elektromagnetisch auch stark zu wechselwirken. Alle Materieteilchen sind Fermionen<sup>3</sup> mit Spin  $1/2$ .

Eine weitere Art von Teilchen sind die Austauscheteilchen, die die bereits erwähnten Wechselwirkungen zwischen den Fermionen vermitteln, und Bosonen<sup>4</sup> mit Spin 1 sind. Die elektromagnetische Wechselwirkung wird durch Austausch von masselosen Photonen, die schwache Wechselwirkung durch Austausch von drei massiven  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$ -Bosonen, und schließlich die starke Wech-

---

<sup>1</sup> Der als Abriss gehaltene Inhalt dieses Abschnitts basiert grundsätzlich auf [2] und [3]. Dort findet der interessierte Leser Erläuterungen und weitere Informationen zu der hier dargestellten Problematik.

<sup>2</sup> Es gibt experimentelle Befunde, die auf eine endliche Masse der Neutrinos hinweisen. Im Rahmen des minimalen Standardmodells werden Neutrinos als masselos betrachtet.

<sup>3</sup> Teilchen mit halbzahligen Spin.

<sup>4</sup> Teilchen mit ganzzahligen Spin.

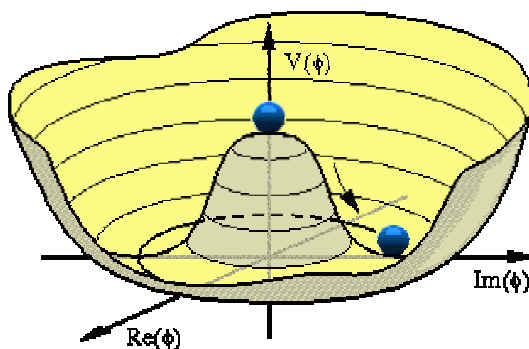
## 2. SUCHE NACH NEUEN TEILCHEN

|          | Generation | Name              | Symbol     | Masse [MeV]          | el. Ladung |
|----------|------------|-------------------|------------|----------------------|------------|
| Leptonen | I          | Elektron          | e          | 0,511                | - 1        |
|          |            | Elektron-Neutrino | $\nu_e$    | $< 3 \cdot 10^{-6}$  | 0          |
|          | II         | Myon              | $\mu$      | 105,7                | - 1        |
|          |            | Myon-Neutrino     | $\nu_\mu$  | $< 0,17$             | 0          |
|          | III        | Tauon             | $\tau$     | 1777                 | - 1        |
|          |            | Tau-Neutrino      | $\nu_\tau$ | $< 24$               | 0          |
| Quarks   | I          | Up                | u          | ca. 5                | + 2/3      |
|          |            | Down              | d          | ca. 7                | - 1/3      |
|          | II         | Charm             | c          | ca. 1500             | + 2/3      |
|          |            | Strange           | s          | ca. 150              | - 1/3      |
|          | III        | Top               | t          | ca. $1,8 \cdot 10^5$ | + 2/3      |
|          |            | Bottom            | b          | ca. 4500             | - 1/3      |

**Tabelle 2.1:** Die fundamentalen Fermionen, ihre Masse und elektrische Ladung [4].

selwirkung durch Austausch von acht Gluonen, deren Masse Null ist, beschrieben. Die Gravitation als vierte Kraft wird im Standardmodell nicht berücksichtigt.

Aus der theoretischen Sicht zeigt sich das Standardmodell als eine Quantenfeldtheorie, deren Basis die  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$  Eichsymmetriegruppe darstellt. Die starke Wechselwirkung wird hier durch die  $SU(3)_C$ -Symmetriegruppe beschrieben, die elektroschwache Wechselwirkung wird durch den Ausdruck  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  repräsentiert. Die Symmetriegruppe der elektromagnetischen Wechselwirkung allein, beschrieben durch  $U(1)_{EM}$ , ist eine Untergruppe von  $SU(2)_L \times U(1)_Y$ .



**Abbildung 2.1:** Das Higgs-Potential eines skalaren Feldes  $\Phi$ :  $V(\Phi) = -\mu^2 \Phi^+ \Phi + \lambda (\Phi^+ \Phi)^2$ ;  $\mu, \lambda = \text{const}$ ,  $\lambda > 0$  [5].

Eine Symmetrie besteht ganz allgemein, wenn das betrachtete physikalische System invariant unter einer unitären Transformation  $U$  bleibt, d.h. wenn gilt  $U H U^\dagger = H$  ( $H$  – Hamiltonoperator des Systems). Die Symmetriegruppen des Standardmodells sind kontinuierlich (haben kontinuierliche Para-

meter), und beziehen sich auf die inneren Quantenzahlen<sup>5</sup>. Mit anderen Worten, die Symmetrien transformieren ein Teilchen in ein anderes mit unterschiedlichen inneren Quantenzahlen, aber – falls die Symmetrie nicht gebrochen ist – mit gleicher Masse.

Falls eine Symmetrie gebrochen ist, bleibt möglicherweise eine Eichsymmetrie als Restsymmetrie übrig. Im Fall der Symmetrie der elektroschwachen Wechselwirkung ist das die bereits erwähnte  $U(1)_{EM}$ -Symmetrie. Den Mechanismus, der diese Brechung zur Folge hat, erklärt man dadurch, dass in den klassischen Feldgleichungen ein neues Feld, das mit den Fermionfeldern und den Eichfeldern wechselwirkt, eingeführt wird. Dieses Feld wird als Higgs-Feld bezeichnet (Abbildung 2.1). Das zum Higgs-Feld gehörende neutrale Teilchen nennt man Higgs-Boson. Das Higgs-Boson ist das einzige Teilchen im Standardmodell, das bis jetzt noch nicht nachgewiesen wurde.

### 2.1.2 Erweiterungen des Standardmodells

Obwohl es bis heute keine experimentellen Befunde gibt, die das Standardmodell widerlegen, weist es neben seiner eleganten Form einige Mängel auf. Der Hauptmangel des Standardmodells liegt darin, dass es zu viele freie Parameter enthält, die nur experimentell bestimmt werden können. Neben den 12 Lepton- und Quarkmassen sind es unter anderem die Kopplungskonstanten der jeweiligen Wechselwirkung. Darüber hinaus erklärt es nicht, warum es ausgerechnet drei Generationen von Quarks und Leptonen gibt oder warum zwei so unterschiedliche Teilchen wie Proton und Elektron exakt dieselbe elektrische Ladung besitzen. Auch der völlige Ausschluss der Gravitation im Standardmodell spricht dagegen, es als eine fundamentale Theorie zu deklarieren.

Darüber hinaus kann das Standardmodell bei sehr hohen Energien nicht mehr gelten. Deshalb wird es durch einige theoretische Modelle erweitert und als deren Grenzfall für niedrige Energien betrachtet. Alle Theorien, die über das Standardmodell hinausgehen, werden erst oberhalb einer Energieskala in der Größenordnung von 1 TeV erkennbar. Die populärsten unter ihnen werden im Folgenden kurz dargestellt:

- Große Vereinheitlichte Theorien (GUTs<sup>6</sup>)

Das Ziel der Großen Vereinheitlichten Theorien besteht darin, die starke und elektroschwache Wechselwirkung durch eine einzige Kopplungskonstante auszudrücken. Die Teilchen werden hier z. B. als Darstellungen der Gruppe  $SU(5)$ , die die Untergruppe  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$  enthält, interpretiert. Die  $SU(5)$  hat 12 zusätzliche Feldquanten (Bosonen), die für die Wechselwirkungen zwischen Quarks und Leptonen bzw. zwischen Quarks mit verschiedenen Flavor-Quantenzahlen zuständig sind.

- String-Theorien

In den String-Theorien werden die Elementarteilchen nicht als punktförmige, sondern als ein-dimensionale ausgedehnte Objekte (Strings) betrachtet, die in einem  $N$ -dimensionalen Raum schwingen können. Die Anzahl der Dimensionen  $N$  wird hier zu 10 oder 11 angenommen. Alle Wechselwirkungen, einschließlich der Quanten-Gravitation, sind in den String-Theorien enthalten. Als Folge existieren endlich viele masselose Zustände, sowie unendlich viele massive Anregungen. Eines der masselosen Anregungen ist das Graviton<sup>7</sup>.

---

<sup>5</sup> Quantenzahlen, die raumzeitunabhängige Eigenschaften, wie z.B. Ladung, Parität etc., eines Teilchens charakterisieren.

<sup>6</sup> Grand Unified Theories.

<sup>7</sup> Spin-2-Boson, Austauschteilchen der Gravitation. Es wurde bis heute trotz intensiver Suche noch nicht entdeckt.

## 2. SUCHE NACH NEUEN TEILCHEN

- Compositeness

Die Grundannahme der Compositeness-Theorien besteht darin, dass alle Fermionen – Quarks und Leptonen – aus denselben Subkonstituenten zusammengesetzt sind. Zwischen den Subkonstituenten agiert dann eine neue starke Wechselwirkung, deren Energieskala  $\Lambda$  von der Größenordnung 1 TeV ist. Dieses Modell würde das Problem der Fermion-Generationen lösen und die Berechnung der Masse der Fermionen ermöglichen.

- Supersymmetrie (SUSY)

Die mit vielleicht größten Erfolgchancen behaftete Erweiterungstheorie zum Standardmodell ist die Supersymmetrie. Hier wird kein Unterschied zwischen Fermionen (Materie) und Bosonen (Kräfte) gemacht; die Teilchenzahl wird verdoppelt: zu jedem Teilchen wird die Existenz eines supersymmetrischen Partners, dessen Spin sich um  $\frac{1}{2}$  unterscheidet, postuliert. Die Nomenklatur dieser neuen Teilchen wird dadurch charakterisiert, dass man die Additive „s-“ den Fermionnamen und „-ino“ den Bosonnamen hinzufügt (z.B. Seletron, Smyon, Gluino, Gravitino etc.)

SUSY erfordert die Einführung einer neuen Quantenzahl R-Parität. Hier wird  $R = +1$  den „alten“,  $R = -1$  den neuen supersymmetrischen Teilchen zugeordnet. Das Produkt der R-Paritäten bleibt im minimalen SUSY-Modell bei Teilchenreaktionen erhalten.

Als Minimales Supersymmetrisches Standardmodell (MSSM) bezeichnet man ein Modell, das die minimale Anzahl von Kopplungen enthält, die man benötigt, um die physikalischen Observablen, wie die Massen für alle Quarks und Leptonen, zu liefern. Ähnlich wie das „normale“ Standardmodell enthält die MSSM-Theorie Higgs-Felder.

## 2.2 Wie wollen wir nach den neuen Teilchen suchen?

### 2.2.1 LHC

Die Suche nach dem Higgs-Boson kann mit den gegenwärtig verfügbaren Beschleunigeranlagen nicht fortgesetzt werden. Die vom Standardmodell vorhergesagte Masse des Higgs-Teilchens  $m_H$  kann mehrere hundert GeV betragen; mit Hilfe der heute zur Verfügung stehenden Beschleuniger konnte  $m_H < 114,1$  GeV ausgeschlossen werden [6]. Erfolglos blieb bis heute auch die Suche nach den supersymmetrischen Teilchen.

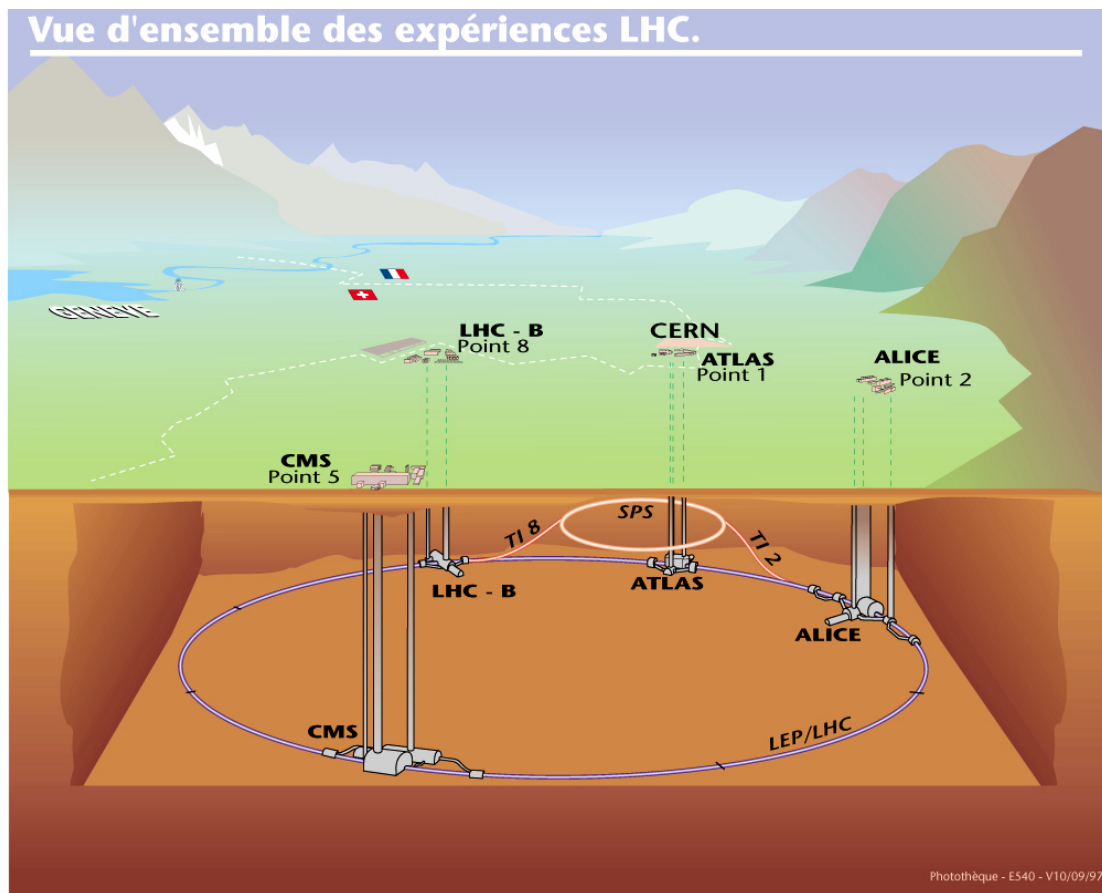
Der Nachweis des neutralen Higgs-Bosons kann nur indirekt über die Identifizierung seiner Zerfallsprodukte erfolgen. Da die Kopplung eines beliebigen Teilchens an das Higgs-Feld proportional zur Masse dieses Teilchens ist, wird sich der dominante Zerfall in der Erzeugung des schwersten Teilchenpaars, das kinematisch möglich ist, manifestieren. Aus einer Vielfalt der Möglichkeiten des Higgs-Zerfalls sind einige Beispiele in der Abbildung 2.3 dargestellt.

Einen neuen, tieferen Einblick in die Gesetze der Natur, unter anderem durch Produktion und Nachweis des Higgs-Bosons, erhofft man sich mit Hilfe des zukünftigen Ringbeschleunigers LHC<sup>8</sup> am Europäischen Forschungszentrum CERN<sup>9</sup> bei Genf zu gewinnen (Abbildung 2.2). Hier werden ab 2007 in dem ehemaligen LEP-Tunnel bei einer Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s} = 14$  TeV und bei einer nominellen Luminosität von  $\mathcal{L} = 2 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  (high luminosity run) Protonen zu Kollisionen gebracht. Bei diesen Energien könnte neben anderen das Higgs-Boson in den Proton-Proton-Reaktionen erzeugt und nachgewiesen werden (Abbildung 2.3).

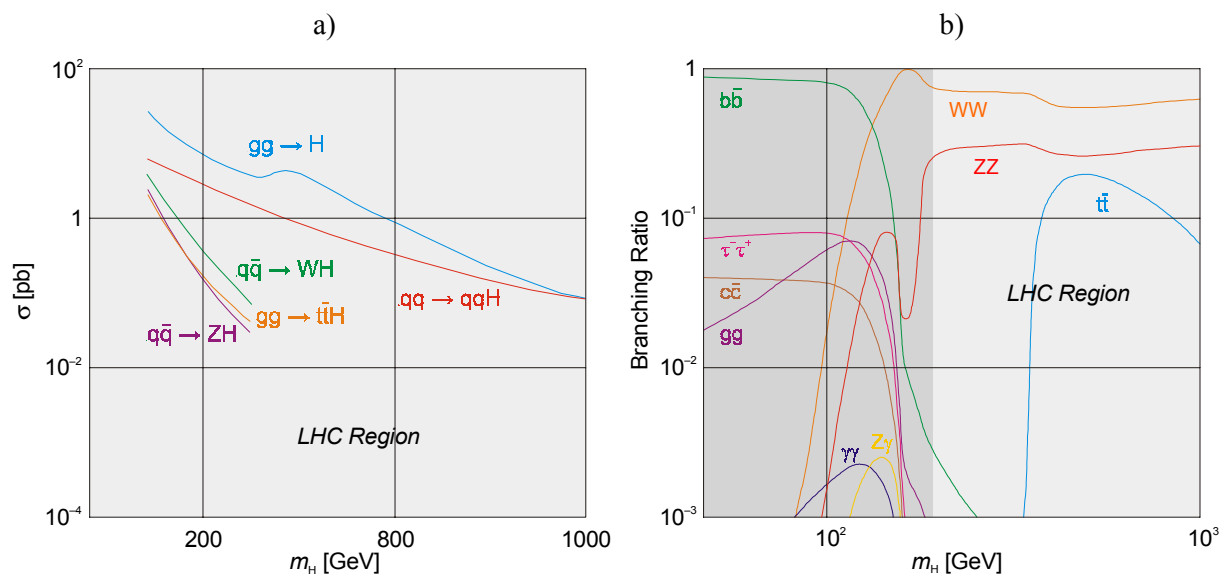
---

<sup>8</sup> Large Hadron Collider.

<sup>9</sup> Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (frühere Bezeichnung für die heutige Organisation Européen pour la Recherche Nucléaire).



**Abbildung 2.2:** Der LHC-Tunnel beim Europäischen Forschungszentrum CERN, Genf [7]. Ab 2007 werden hier vier Experimente durchgeführt, die als Ziel die Suche nach den Higgs- und Supersymmetrie-Teilchen (ATLAS, CMS), Schwerionenforschung (ALICE) und CP-Verletzung im B-Sektor (LHC-B) haben.



**Abbildung 2.3:** Die Produktion (a) und der Zerfall (b) des Higgs-Bosons H am LHC [8]. Bei der Erzeugung von H ist der Kanal  $gg \rightarrow H$  dominierend. Bei den Zerfällen wird in erster Linie nach den Kanälen  $H \rightarrow WW$  und  $H \rightarrow ZZ$  und darauffolgenden Zerfallsprodukten, wie z.B.  $ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$ , Ausschau gehalten.

## 2. SUCHE NACH NEUEN TEILCHEN

An den Wechselwirkungspunkten des LHC-Speicherrings werden folgende vier Experimente durchgeführt:

- ATLAS<sup>10</sup> – Suche nach den Higgs-Bosonen und den supersymmetrischen Teilchen;
- CMS<sup>11</sup> – ähnlich wie beim ATLAS wird hier die Suche nach Higgs-Bosonen und supersymmetrischen Teilchen fortgesetzt;
- ALICE<sup>12</sup> – Untersuchung des Quark-Gluon-Plasmas in Schwerionen-Kollisionen;
- LHC-B<sup>13</sup> – Messungen der CP-Verletzung im System der B-Mesonen.

### 2.2.2 CMS

Eines der Experimente, das für den Nachweis von Higgs-Bosonen konzipiert ist, ist der am Punkt 5 des LHC-Speicherrings gelegene CMS-Detektor. Er weist eine um den Wechselwirkungspunkt symmetrische Konstruktion auf, die aus zylindrischen Komponenten und Endkappen besteht (Abbildung 2.4). Längs der Strahlachse ist er in fünf Räder eingeteilt, die auseinander gebracht werden können, um beim Aufbau und im Falle einer Wartung oder Reparatur den Zugang zu den einzelnen Detektor-komponenten zu ermöglichen. Die Länge des Detektors beträgt 21,6 m, die Höhe 14,6 m und er hat ein Gesamtgewicht von 14.500 Tonnen. Der CMS-Detektor besteht aus vier Subdetektoren, die weiter unten ausführlicher beschrieben werden. Der supraleitende Solenoid erzeugt ein Magnetfeld von ca. 4 Tesla. Der magnetische Fluss wird in dem außerhalb des Solenoids befindlichen Eisenjoch, das zugleich als Träger des Myonsystems fungiert, zurückgeführt. Die am Wechselwirkungspunkt erzeugten elektrisch geladenen Teilchen erfahren im Magnetfeld eine Spurkrümmung, wodurch die Impulsmessung in den Spurkammern des Detektors möglich ist (Abbildung 2.5). Die Energiemessung findet im elektromagnetischen und hadronischen Kalorimeter statt.

Außer dem Myonsystem, das im folgenden Abschnitt detaillierter beschrieben wird, beinhaltet der CMS-Detektor folgende Subsysteme:

- Der zentrale Spurdetektor (Inner Tracker)

Der direkt am Wechselwirkungspunkt gelegene, 6m lange und mit 2,6 m Durchmesser zentrale Spurdetektor besteht aus Silizium-Pixel-Zählern (rechteckige Halbleiter mit einer Oberfläche von ca.  $10^{-2}$  mm<sup>2</sup>) und Siliziumstreifen-Zähler (Länge 12,5 cm). Die typische Ortsauflösung liegt bei 10 bis 40  $\mu$ m. Die relative Impulsauflösung hängt vom gemessenen Impuls  $p$  ab und beträgt  $0,005 + 0,15p$  ( $p$  in TeV). Der zentrale Spurdetektor eignet sich besonders für die Bestimmung des Zerfallsortes von kurzlebigen Teilchen in der Nähe des Wechselwirkungspunktes.

- Das elektromagnetische Kalorimeter (ECAL)

Das elektromagnetische Kalorimeter besteht aus ca. 110.000 23 cm langen PbWO<sub>3</sub>-Kristallen. Es ist hauptsächlich für die Erkennung und Energiemessung von Elektronen und Photonen, die bei der Wechselwirkung mit den Kristallen elektromagnetische Schauer bilden, konstruiert. Die Intensität des dabei entstehenden Fluoreszenzlichts ist der Teilchenenergie proportional und wird mit den direkt an den Kristallen angebrachten Silizium-Photodioden gemessen. Die Unterscheidung zwischen den Elektronen und Photonen erfolgt bereits im inneren Spurdetektor (die Photonen hinterlassen dort keine Spuren). Bei einer Elektronenenergie von 120 GeV beträgt die Energieauflösung 1 %.

---

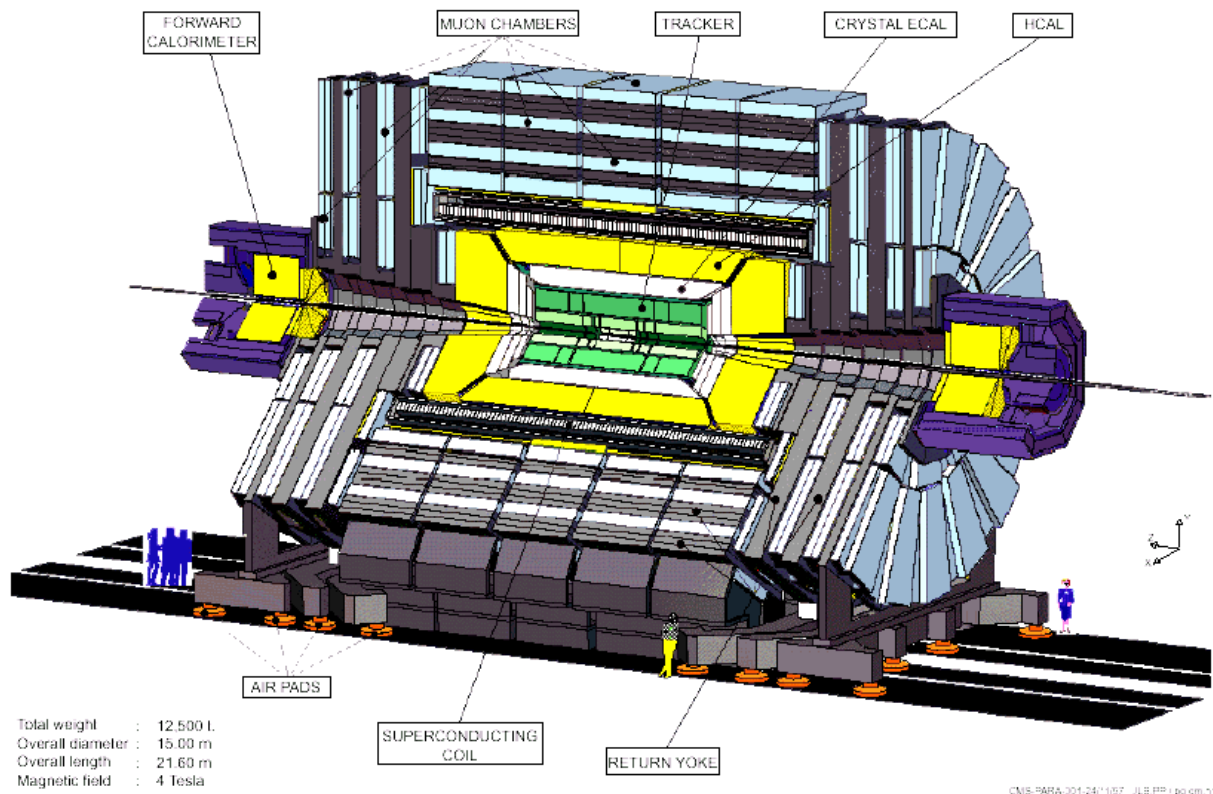
<sup>10</sup> A Torrodial LHC Apparatus.

<sup>11</sup> Compact Muon Solenoid.

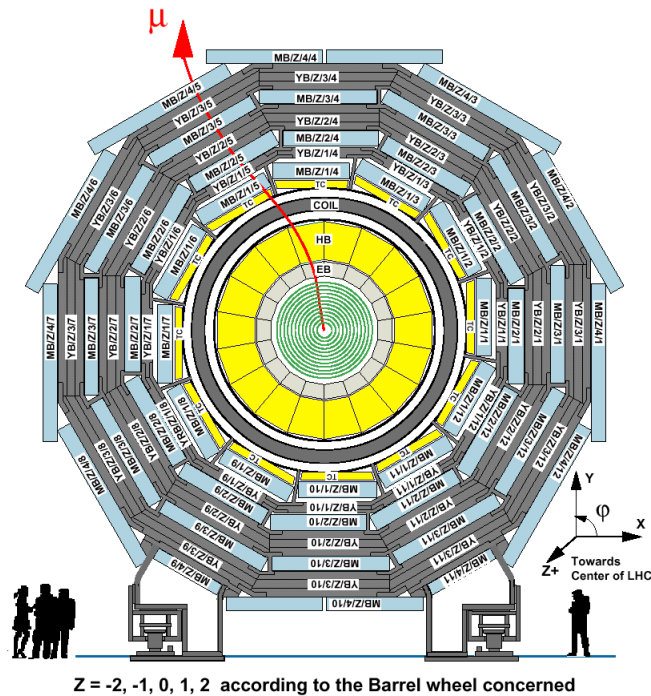
<sup>12</sup> A Large Ion Collider Experiment.

<sup>13</sup> LHC-Experiment, spezialisiert auf B-Physik.





**Abbildung 2.4:** Der CMS-Detektor [9]. Er besteht im Wesentlichen aus vier Subdetektoren: dem inneren Spurdetektor, dem elektromagnetischen und hadronischen Kalorimeter sowie dem Myonsystem. Er hat eine Länge von 21,6 m, einen Durchmesser von 14,6 m und ein Gesamtgewicht von 14.500 Tonnen.



**Abbildung 2.5:** Der Querschnitt des CMS-Detektors [9]. Ein Myon passiert die einzelnen Subdetektoren. Durch Messung der Krümmung seiner Bahn im Magnetfeld kann man seinen Impuls bestimmen.

## 2. SUCHE NACH NEUEN TEILCHEN

- Das hadronische Kalorimeter (HCAL)

Dem elektromagnetischen folgt in radialer Richtung das hadronische Kalorimeter. Es dient zur Identifizierung und Energiemessung der stark wechselwirkenden Teilchen. Anhand der Berechnung der fehlenden Energie kann man damit auch die Neutrinoenergie bestimmen. Es besteht im Wesentlichen aus hintereinander folgenden Schichten Kupfer (5 cm) und Szintillatormaterial (4 mm). Die in der Reaktion erzeugten Hadronen wechselwirken mit den Cu-Kernen, was zur Folge die Bildung von hadronischen Schauern hat. Die dann in den Plastikszintillatoren freigesetzten Photonen liefern Informationen über die Energie der Hadronen.

### 2.2.3 Das Myonsystem

Ein wichtiger Zerfallskanal des Higgs-Bosons für  $m_H > 130$  GeV ist

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$$

Für den Nachweis und die Impulsmessung dieser sekundären Myonen dient im CMS-Detektor das Myonsystem. Myonen verlieren auf Grund ihrer hohen Masse kaum Energie durch Bremsstrahlung und können somit als einzige Teilchen (außer Neutrinos) die äußeren Schichten des CMS-Detektors erreichen. Daher wird das Myonsystem in diesem Teil des CMS-Detektors angebracht. Es beinhaltet drei verschiedenartige Detektortypen:

- Kathoden-Streifen-Kammern (CSC<sup>14</sup>)

Wegen der hohen Untergrundrate sowie der Inhomogenität des Magnetfelds im Endkappenbereich wird dort ein Myondetektortyp eingesetzt, der auch dort hinreichend gute Orts- und Zeitauflösung aufweisen kann. Für diesen Zweck eignen sich Vieldrahtproportionalkammern, deren Kathodenstreifen senkrecht zu den Anodendrähten orientiert sind. Sie werden in trapezförmiger Ausführung im CMS-Detektor konzentrisch um die Strahlröhre positioniert.

- Myon- bzw. Driftkammern (DT<sup>15</sup>)

Radial um die Detektorachse außerhalb der Kalorimeter und des Solenoids ist die Untergrundrate gering. Dieser Bereich eignet sich für den Einsatz der Driftkammern (Myonkammern). Sie werden in die Zwischenräume des Eisenjochs eingelagert. Über die Eigenschaften der Myonkammern wird im nächsten Abschnitt ausführlicher berichtet.

- Widerstands-Platten-Kammern (RPC<sup>16</sup>)

Sowohl im Endkappen- als auch im Radialbereich um die Myonkammern werden auch gasgefüllte Parallelplattenkammern verwendet. Da sie eine hohe zeitliche Auflösung aufweisen, werden sie als Trigger benutzt.

### 2.2.4 Die Myonkammern

Die zum Nachweis und zur Impulsmessung der Myonen bestimmten Driftkammern bestehen aus drei sogenannten Superlagen, die einzeln den eigentlichen Detektor darstellen, und einem Wabenträger (Abbildung 2.6). Je nach Lage in dem Detektor werden sie in vier verschiedenen Ausführungen, die sich hauptsächlich in ihrer Größe unterscheiden, gebaut (MB1, MB2, MB3 und MB4; siehe Abbildungen 2.4 und 2.5). Am III. Physikalischen Institut A der RWTH Aachen werden 60 MB1-Kammern und

---

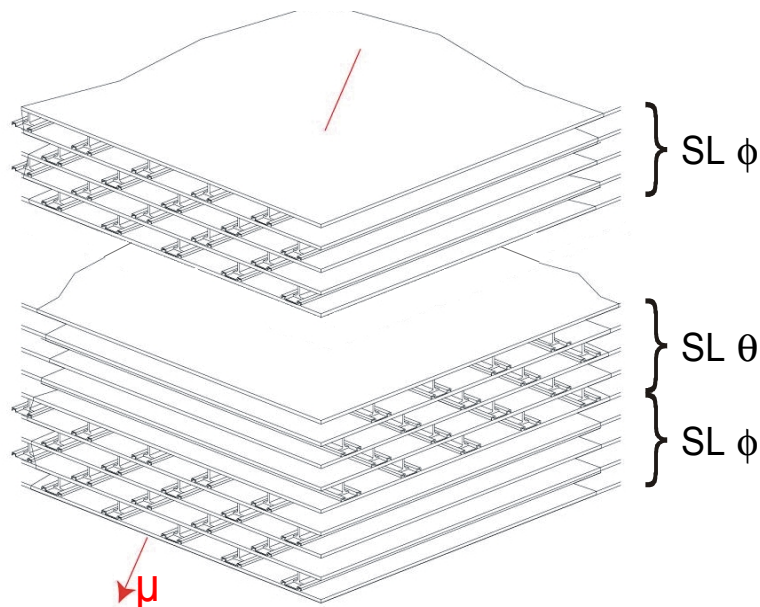
<sup>14</sup> Cathode Strip Chambers.

<sup>15</sup> Drift Tubes.

<sup>16</sup> Resistive Plate Chambers.



**Abbildung 2.6:** (a) – Eine komplette, mit Elektronik bestückte Aachener Myonkammer [10]. Sie besteht aus zwei  $\phi$ -, einer  $\theta$ -Superlage und dem Abstandshalter. Die obere  $\phi$ -Superlage ist noch nicht mit dem HV-Deckel verschlossen, an der unteren ist für Testzwecke ein HV-Deckel aus Plexiglas angebracht. (b) – Vier fertige und getestete Myonkammern bereit für den Transport zum CERN [11].



**Abbildung 2.7:** Passiert ein Myon eine Kammer, so kann man seine Winkelkomponenten unabhängig voneinander durch die dargestellte Anordnung der Superlagen ( $\phi$ - und  $\theta$ -Superlagen sind zueinander um  $90^\circ$  gedreht) messen. Die Spurrekonstruktion innerhalb einer Superlage wird durch die Verschiebung der einzelnen Lagen um eine halbe Zellenbreite zueinander optimiert. Zwischen der  $\theta$ - und der oberen  $\phi$ -Superlage befindet sich der Wabenträger (hier nicht eingezeichnet), um den Abstand zwischen den beiden  $\phi$ -Superlagen zu erhöhen und dadurch die Myon-Bahnkrümmung und somit den Impuls in der  $\phi$ -Richtung besser zu bestimmen.





In der Mitte der Zelle befindet sich der Anodendraht, an dem eine Spannung von +3.600 V angelegt ist. Die Kathoden der Driftzellen haben die Form dünner Streifen und sind an den beiden Innenflächen der I-Träger geklebt. An sie wird eine Spannung von -1.200 V angeschlossen. Um den Feldverlauf innerhalb der Zelle zu optimieren, werden zusätzliche Elektroden für die Feldformung in der Zelle angebracht. An diese streifenförmigen Anoden, die auf die Trennplatten geklebt sind, wird eine Spannung von +1.800 V angelegt.

Die Zellengeometrie und die Wahl der obigen Spannungsparameter impliziert eine absolute Ortsauflösung des durchgehenden Myons von  $\Delta r_{\text{Zelle}} = 250 \mu\text{m}$ . Die beschriebene Anordnung der Lagen und Superlagen erlaubt uns, diese Auflösung pro Kammer zu erhöhen ( $\Delta r_{\text{Kammer}} = 100 \mu\text{m}$ ).

Bedingt durch die Fehler in der Koordinatenmessung im Myonsystem und in der Bestimmung des Magnetfelds, sowie durch die Ungenauigkeit in der Festlegung der Wechselwirkungsposition, ist die Impulsauflösung im CMS

$$\frac{\Delta p}{p} \approx 10 \% \cdot p[\text{TeV}] \oplus 8 \% \quad (2.1)$$

Dies bedeutet etwa 2 % für ein Myon mit  $p \approx 100 \text{ GeV}$  [9].

### 2.2.5 Die Driftgeschwindigkeit

Durchdringt ein geladenes Teilchen (i.e. ein Myon) hoher Energie die mit einem Gas (für die Myonkammern Ar/CO<sub>2</sub>-Gemisch im Verhältnis 85/15) gefüllte Kammer, so ionisiert es das Gas entlang seiner Bahn. Die dadurch freigesetzten Elektronen werden durch das angelegte elektrische Feld  $E$  zur Anode der Driftzelle hin beschleunigt. Dabei werden sie durch Stöße mit anderen Atomen abgebremst und – bei genügend hohem elektrischem Feld – können sie in der Drahtnähe ( $E \sim 1/r$ ) weitere Elektronen aus den Gasatomen herausschlagen (Lawinenbildung). Das Wechselspiel zwischen Beschleunigung im elektrischen Feld und den Stößen mit Gasatomen führt zu einer effektiven, konstanten Driftgeschwindigkeit  $u$ . Anhand der Messung der Driftzeit der Elektronen kann man nun den Ort des Teilchendurchgangs und damit die Teilchenspur rekonstruieren. Es wird demnach als Ziel gesetzt, die Driftgeschwindigkeit  $u$  konstant, d.h. unabhängig vom Ionisationsort  $r$ , zu halten ( $u \approx 5,5 \cdot 10^4 \text{ m/s}$  in den Myonkammern).

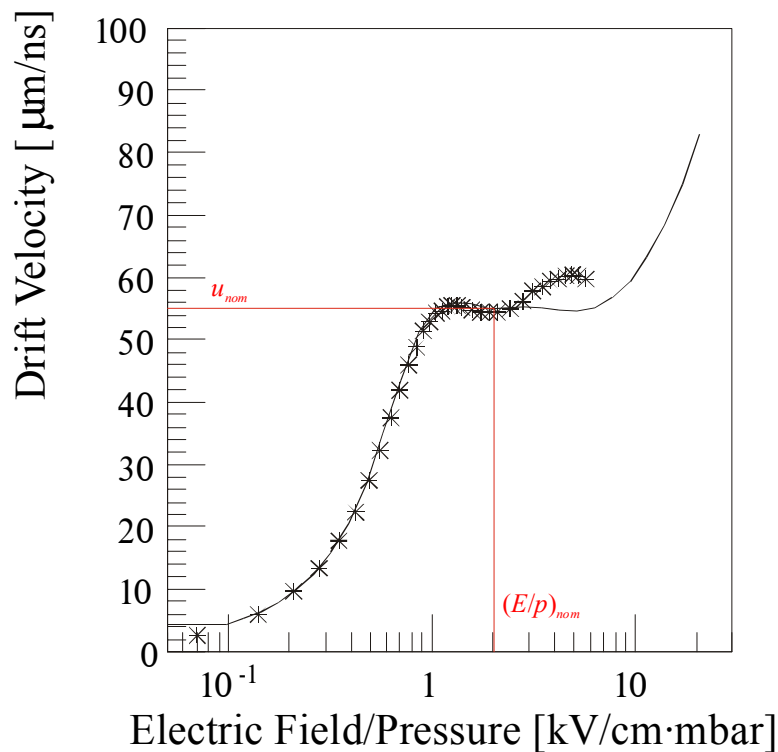
Nach [12] hängt diese Geschwindigkeit explizit von der Größe  $E/p$  ( $p$  – Gasdruck) ab, Abbildung 2.9. Das Verhältnis  $E/p$  wird so gewählt, dass die Driftgeschwindigkeit sich nicht merklich ändert bei kleinen Änderungen von  $E/p$ . Das elektrische Feld innerhalb der Zelle ist aber nicht exakt homogen (Abbildung 2.8) und zeitliche Schwankungen des Feldes sind durchaus denkbar. Es ist deshalb wünschenswert, um die Bedingung  $u(E/p) = \text{const}$  so gut wie möglich zu erfüllen, die Zellen bei konstantem Gasdruck zu betreiben.

## 2.3 Bau und Test der CMS-Myonkammern

Um die Zusammenfassung über die Konstruktion und Funktion der Myonkammern zu vervollständigen, soll noch eine kurze Übersicht über den Bau und die Tests der Myonkammern im III. Physikalischen Institut A der RWTH Aachen gegeben werden.

Der Zusammenbau der Myonkammer verläuft in einzelnen Schritten aus vorgefertigten Komponenten. Während des Produktionszyklus werden laufend Qualitätskontrollen vorgenommen. Sobald eine Kammer fertiggestellt ist, wird sie einem Funktionstest unterzogen.

## 2. SUCHE NACH NEUEN TEILCHEN



**Abbildung 2.9:** Die Abhängigkeit der Driftgeschwindigkeit  $u$  vom Verhältnis  $E/p$  anhand der gemessenen (Sterne) und simulierten (durchgezogene Linie) Daten in einem Gasgemisch Ar/CO<sub>2</sub> (85%/15%) [9]. Die Forderung nach einer konstanten Driftgeschwindigkeit wird durch Wahl der Parameter  $E$  und  $p$  so optimiert, dass kleine Schwankungen der Größe  $E/p$  kaum Einfluss auf  $u$  haben. Das optimale Wertepaar wurde für  $u_{nom} = 5,5 \cdot 10^4$  m/s und  $(E/p)_{nom} = 1,1$  kV/cm·mbar gefunden.

Zunächst werden die Einzelteile, aus denen eine Driftzellenlage besteht, auf eigens dafür gefertigten Klebetischen zusammengebaut. Der erste Schritt besteht in der Klebung der I-Träger auf die mit Feldformungsstreifen versehenen Aluminiumplatten. Dann werden die Anodendrähte zusammen mit den Klemmblöcken, zwischen denen sie eingespannt sind, in die Zellen eingesetzt. Anschließend wird die obere Platte, die zugleich den Boden für die nächste Lage darstellt, auf die I-Träger geklebt. Diese Prozedur wird drei mal wiederholt.

Nachdem alle Lagen zu einer Superlage zusammengeklebt sind, erfolgt die Klebung der Rahmenelemente. Dann werden die Superlagen an beiden noch offenen Enden mit der HV- und FE-Elektronik bestückt. Ist die Bestückung abgeschlossen, werden die Superlagen mit den entsprechenden Deckeln verschlossen. Anschließend werden eine  $\theta$ - und zwei  $\phi$ -Superlagen sowie der Wabenträger zu einer Myonkammer zusammengeklebt.

Die Qualitätskontrolle erfolgt praktisch bei jedem Produktionsschritt durch Überprüfung der Fertigungstoleranzen. Als wichtige Tests sollte man die Vermessung der Anodendrähte auf ihre mechanische Spannung und Position, Hochspannungsfestigkeit der Myonkammer in Luft und Gas, sowie die Gasdichtigkeitsmessungen an den einzelnen Superlagen bzw. kompletten Kammern (siehe Kapitel 4) erwähnen. Die Funktion der fertigen Myonkammern wird in einem speziell dafür konstruierten Teststand durchgeführt. Hier wird die Auslese und Auswertung der Daten durch Myonen aus der kosmischen Strahlung vorgenommen (Abbildung 2.10).



**Abbildung 2.10:** Der Aachener Teststand [10]. Um die Qualität und Funktion der gebauten Myonkammern zu überprüfen, werden diese verschiedenen Tests unterzogen. Im Bild sieht man eine Kammer, an der ein Hochspannungsfestigkeitstest vorgenommen wird (rechts auf dem gelben Gestell) sowie eine Kammer und ein paar einzelne Superlagen, deren Funktionen durch Auslese und Auswertung der kosmischen Myonen bewerkstelligt wird (links in der rosafarbenen, speziell dafür konstruierten Testvorrichtung).





## Kapitel 3

# Die Drucksensoren für die CMS-Myonkammern

### 3.1 Wozu braucht man Drucksensoren?

Sowohl im CMS-Experiment als auch während der meisten Tests in den Produktionszentren werden die Myonkammern permanent unter einem statischen bzw. dynamischen Gasbetrieb arbeiten. Es gibt daher verschiedene Gründe dafür, den Gasdruck  $p$  in den Myonkammern zu beobachten und zu kontrollieren:

- Wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt wurde, wird die Driftgeschwindigkeit  $u$ , die konstant sein sollte, durch die Größe  $E/p$  bestimmt. Es wird also angestrebt, beide Größen  $E$  und  $p$  so gut wie möglich während des CMS-Betriebs konstant zu halten.
- Im CMS-Experiment werden verschiedene Kammern unterschiedlichen Gasfluss erfahren, der aber lokal zeitlich konstant sein sollte. Man kann ihn jedoch nicht überall messen, und dessen theoretische Berechnung ist – wenn überhaupt möglich – sehr schwierig. Man ist aber imstande, durch die Bestätigung des konstanten Drucks indirekt Aufschluss über einen konstanten Gasfluss in den Kammern zu erhalten.
- Die Myonkammern sollen gegen einen Gasdruck von mindestens 100 mbar über dem Umgebungsdruck resistent sein. Die Gefahr, diesen Wert zu überschreiten, würde sich in einem schnellen, unerklärlichen Druckanstieg manifestieren. Eine genaue und zuverlässige Druckkontrolle würde diese Situation signalisieren, und Gegenmaßnahmen könnten dann unverzüglich getroffen werden.
- Die gebauten Kammern werden vor allem in den Produktionszentren einer Reihe von Dichtigkeits- und Drucktests unterzogen (siehe Kapitel 4). Man kann Aussagen über die Qualität der Kammern treffen, wenn man die Kammern mit Gas füllt und den Druckabfall gegen die Zeit registriert.

### 3. DIE DRUCKSENSOREN FÜR DIE CMS-MYONKAMMERN

#### 3.1.1 Gaseigenschaften und Gasverteilung des Myonsystems

Die wichtigste Eigenschaft des verwendeten Gases besteht in der Gewährleistung der gesättigten Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger. Des Weiteren soll das Gas nicht brennbar, wohl aber billig sein. Auf etwaige organische Komponenten, die eine Ursache für einen schnellen Verschleiß der Kammern sein könnten (Ablagerung der durch die Ionisationsprozesse entstandenen Polymere an den Anodendrähten), soll verzichtet werden.

Um diesen Anforderungen zu entsprechen wurde ein Gasgemisch aus Ar/CO<sub>2</sub> als Betriebsgas für die Myondriftkammern gewählt, wobei das Argon als Ionisationsgas und das Kohlendioxid als Löschgas fungieren.

Eine Reihe von Untersuchungen ergab, dass der CO<sub>2</sub>-Gehalt in dem Gasgemisch nicht weniger als 10 % betragen sollte, da sonst der Löschmechanismus beeinträchtigt sein könnte. Die obere Schranke für den CO<sub>2</sub>-Gehalt richtet sich nach der Zellengeometrie und kann Werte bis etwa 80 % annehmen [13]. Für das CMS-Projekt hat man sich auf ein Mischverhältnis Ar/CO<sub>2</sub> zu jeweils 85 % bzw. 15 % geeinigt. Die Mischung der beiden Gaskomponenten wird dann in einer eigens dafür gebauten Gasmischanlage am CMS erfolgen.

Das auf diese Weise zubereitete Gasgemisch wird dann zu den einzelnen Kammern über ein verzweigtes System aus Leitungen, Verteilern, Ventilen etc. geliefert. Abbildung 3.1 zeigt die Gasverteilung an einem der fünf Räder des CMS-Detektors: Vom Verzweigungspunkt ①, an dem die Gasverteilung an die einzelnen Räder bereits erfolgt, wird das Gas über ca. 100 m lange Leitungen zu dem sich an jedem Rad befindlichen Gasarmaturen Brett ② geleitet. Hier erfolgt die weitere Verteilung des Gases an die 50 jedem Rad zugehörigen Myonkammern. An jeder Kammerseite wird dann ein Gasverteiler angebracht ③, in welchem das Gas zunächst über drei gleich lange (ca. 50 cm) Leitungen zu den drei Superlagen der Kammer verteilt wird (Abbildung 3.2 und 3.3). Eine weitere Funktion des Gasverteilers besteht darin, mit Hilfe der in ihm eingebauten Drucksensoren den Gasdruck in der Kammer zu messen (siehe hierzu Kapitel 3.1.2). Innerhalb einer Superlage wird die Gasverteilung ④ zu den einzelnen Lagen und Driftzellen stattfinden (d.h. jeweils 200 bis 400 Zellen).

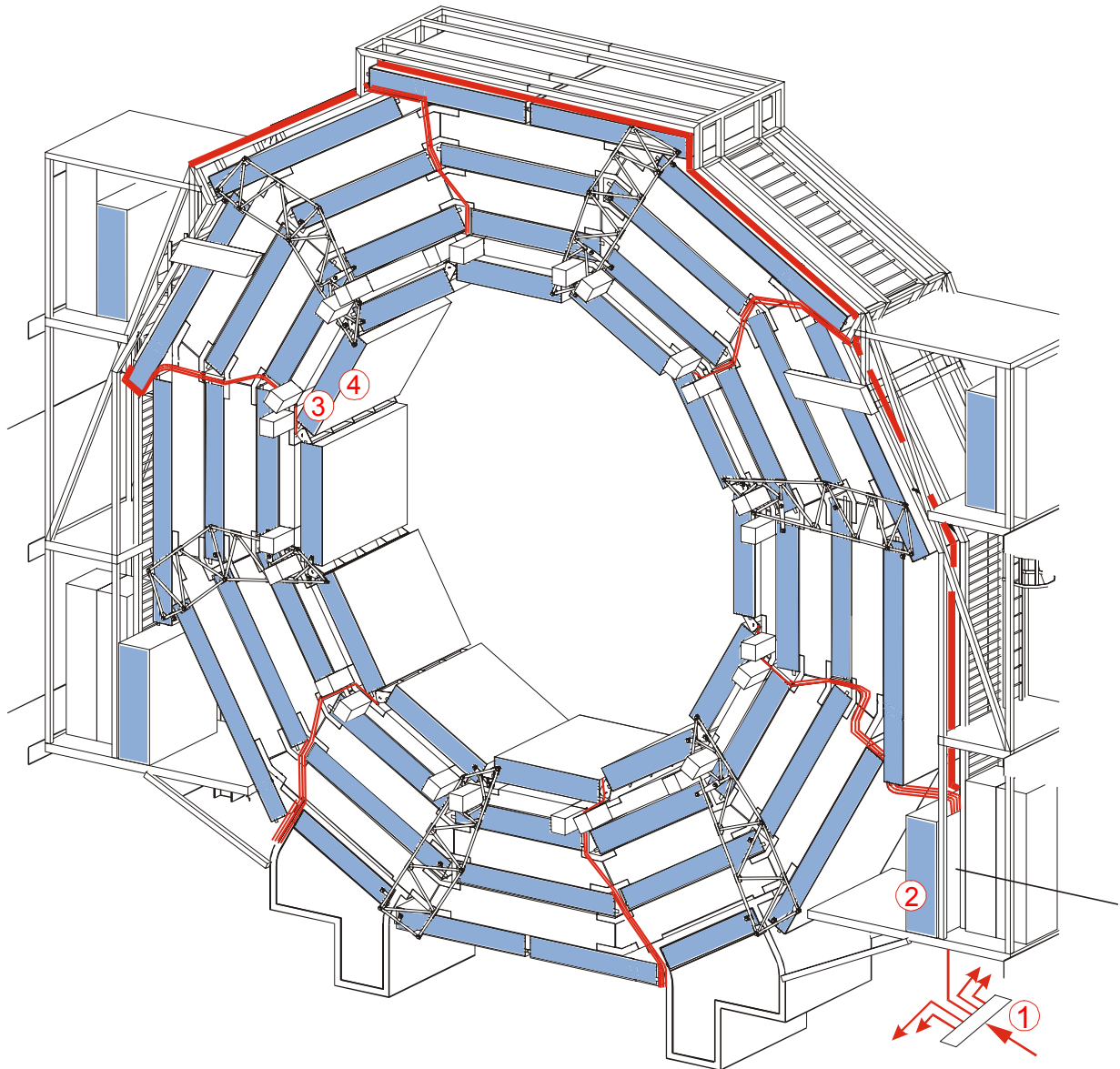
Nach dem Durchgang durch die Driftzellen und Lagen wird das Gas aus den drei Superlagen an der anderen Seite der Kammer in dem anderen Gasverteiler zusammengeführt. Die Vereinigung der verschiedenen Gasleitungen erfolgt Schritt für Schritt auf analoge Weise wie deren Verzweigung bis zu der Gasquelle zurück. Nach jedem so beschriebenen Umlauf wird etwa 10 % des Gases erneuert.

Der Druck in den Kammern sollte einige mbar über dem Umgebungsdruck liegen, so dass durch eventuelle Leckstellen keine Luft in die Gasleitungen bzw. Kammer hineindiffundieren kann. Der Gasfluss wird in den Kammern typisch 50 l/h und maximal 150 l/h betragen.

#### 3.1.2 Die Drucksensoren

Für die Überwachung des Gasdrucks in den Myonkammern während der Testphase in den Produktionszentren und während des Betriebs im CMS wurde nach geeigneten Drucksensoren gesucht. Die richtige Wahl der einzusetzenden Sensoren sollte folgende Aspekte berücksichtigen:

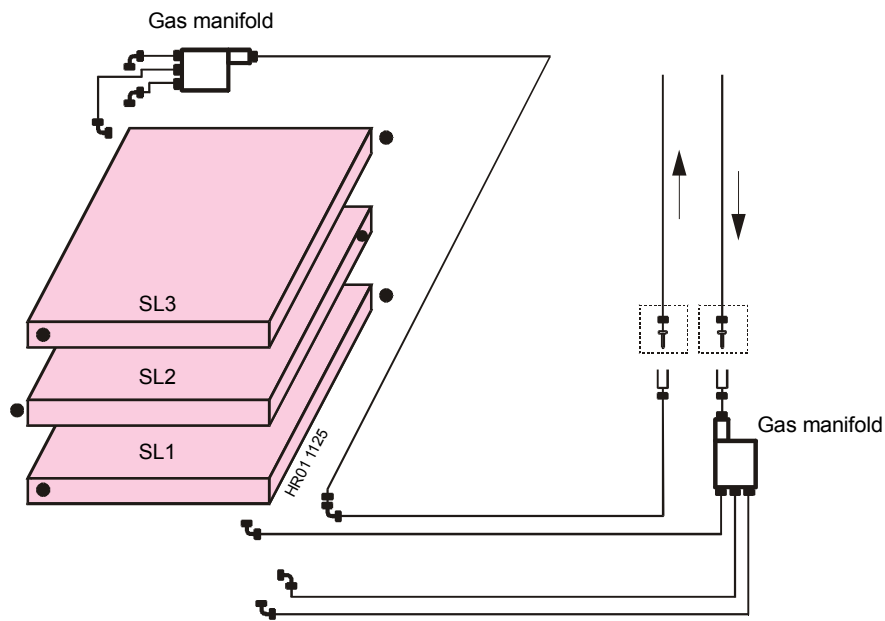
- Die Sensoren sollen klein sein (Platz). Sie werden bei den Myonkammern in den Druckverteiler integriert. Die Gasverteiler sollen dort aus technischen Gründen an folgenden zwei Stellen angebracht werden: einmal an der Kammer selbst, am Wabenträger zwischen der inneren  $\phi$ - und der  $\theta$ -Superlage, und einmal in dem Eisenjoch. In beiden Fällen steht nur etwa 10 bis 15 cm Platz für die Gasverteiler zur Verfügung. Die Konstruktion der Gasverteiler erlaubt also in seinem Innern einen Raum von wenigen cm<sup>3</sup> für die Sensoren (Abbildung 3.3). Daher sollten die Sensoren möglichst kompakt beschaffen sein.



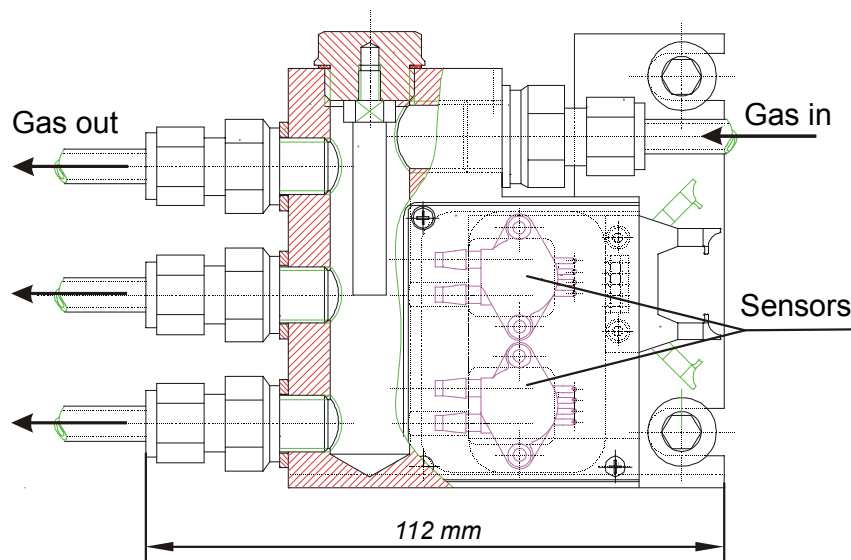
**Abbildung 3.1:** Gasverteilung an einem Rad des CMS-Detektors. Die Gasleitungen des Vorlaufs sind hier rot markiert. Die Verzweigungspunkte entlang einer Gasleitungstrecke sind: 1 – Radverteilung; 2 – Gasarmaturentafel mit Verteilung auf 50 Kammern; 3 – Gasverteiler an der Kammer mit Verteilung auf drei Superlagen; 4 – Verteilung im Innern einer Superlage auf die einzelnen Lagen und Driftzellen. Der Rücklauf erfolgt auf analoge Weise und wird hier nicht dargestellt.

- Die insgesamt 250 Kammern werden, wie bereits erwähnt, mit je zwei Gasverteilern ausgestattet. Nimmt man an, dass in jedem Gasverteiler die Gasdruckmessung mit zwei Sensoren erfolgt, so sind es letztendlich 1000 Drucksensoren, die allein für den CMS-Betrieb benötigt werden. Rechnet man hinzu noch diejenigen Sensoren, die für die Gasüberwachung der Myonkammern in den Produktionszentren in der Testphase gebraucht werden (siehe Kapitel 4) und die Sensoren, die als Reserve bereitgehalten werden, so kommt man auf eine Zahl der zu beschaffenden Sensoren von etwa 1100 bis 1200. Aus diesem Grund sollte der Stückpreis der Sensoren relativ niedrig sein.

### 3. DIE DRUCKSENSOREN FÜR DIE CMS-MYONKAMMERN



**Abbildung 3.2:** Schematische Darstellung der Gasverteilung an einer Myonkammer [11]. Das Gas wird zunächst in einem Gasverteiler über drei gleich lange Leitungen an die drei Superlagen verteilt. Die Gasanschlüsse an den einzelnen Superlagen sind so angeordnet, dass die Gaszufuhr an einer Ecke der Kammer stattfindet. Nach dem Durchgang durch die Superlagen wird das Gas an der diagonal gegenüberliegenden Ecke der Kammer aus den Superlagen austreten, in einem anderen Gasverteiler vereinigt, und in den Kreislauf weitergeleitet.



**Abbildung 3.3:** Gasverteiler der Myonkammer. Die Druckmessung erfolgt jeweils mit Hilfe der zwei Drucksensoren. Ein Ausgang jedes Sensors ist mit dem Inneren des Verteilers verbunden, der andere ist der Außenluft ausgesetzt, so dass die Messung stets relativ zum Umgebungsdruck erfolgt. Der Messbereich dieser Drucksensoren beträgt  $\pm 100$  und  $\pm 500$  mbar (relativ). Die Orientierung der Sensoren musste später revidiert werden (siehe Abschnitt 3.4.3).

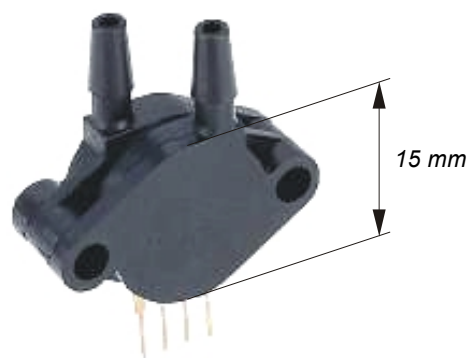
### 3. DIE DRUCKSENSOREN FÜR DIE CMS-MYONKAMMERN

- Der Druckbereich der im Betrieb genommenen Myonkammern ist relativ niedrig (10 bis 20 mbar Überdruck), die Schwankungen des atmosphärischen Drucks gehen bis zu ca. 35 mbar. Für die Druck- und Gasdichtigkeitstests werden allerdings Sensoren benötigt, die imstande sind, einen Überdruck von bis zu 100 mbar und mehr messen zu können.
- Wegen der großen Stückzahl und Platzierung an unzugänglichen Stellen will man die Sensoren im CMS-Betrieb der Kammern, aber auch während der Tests in Produktionszentren, über längere Zeiten (Stunden, Tage) kontinuierlich überwachen. Deswegen sollten die gesuchten Sensoren imstande sein, die Messdaten elektronisch zu registrieren.
- Die Sensoren werden im Einsatz typischerweise einem relativ kleinen Überdruck ausgesetzt. Die Genauigkeit der Sensoren sollte deshalb ca. 1 mbar betragen.
- Für den LHC-Betrieb ist eine Laufzeit von mindestens 10 Jahren vorgesehen. Somit sollte die Lebensdauer der verwendeten Sensoren diesen Zeitraum überschreiten.
- Der CMS-Detektor wird im Betrieb äußeren Magnetfeldern und hoher Teilchenstrahlung ausgesetzt. Die Arbeit der Sensoren soll dadurch nicht beeinträchtigt werden.

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen und nach Überprüfung mehrerer Angebote wurden zwei Sensortypen der Firma *Motorola* ausgesucht. Es handelt sich dabei um Sensoren *MPX2050DP* bzw. *MPX2010DP*, die für die Messung der Druckdifferenzen vorgesehen sind<sup>1</sup>, und deren Arbeitsbereich  $\pm 500$  bzw.  $\pm 100$  mbar entspricht (Abbildung 3.4).

Die Arbeitsweise dieser Sensoren beruht auf dem piezoelektrischen Effekt: Über einen Silikon-schwamm wird der Druck auf eine Membran, die fest mit einem Quarzkristall verbunden ist, ausgeübt. An den Kristall ist eine Spannung von 12 Volt angelegt. Falls der Sensor keinen Druck erfährt, so fließt ein Offsetstrom und der Ausgangssignal beträgt in diesem Fall  $V_{\text{off}} = 1$  mV. Wird auf das Quarzkristall ein Druck ausgeübt, so ändert sich durch den piezoelektrischen Effekt sein Widerstand proportional zum Druck. Der Ausgangssignal  $V_{\text{out}}$  kann dann bis maximal 58 mV betragen.

Beide Sensortypen sind verformungsresistent bis zu einem Wert von 750 mbar (Druckdifferenz an den beiden Sensoreingängen), können in einem Temperaturbereich von  $-40$  bis  $+125$  °C arbeiten und haben sehr kurze Ansprechzeit (ca. 1 ms) [14].



**Abbildung 3.4:** Drucksensor vom Typ *MPX2050DP* bzw. *MPX2010DP*, deren Arbeitsbereich  $\pm 500$  bzw.  $\pm 100$  mbar (relativ) entspricht. Der Druck wird über eine homogene Silikonmembran im Innern des Sensors auf einen Quarzkristall ausgeübt. Der Kristallwiderstand ändert sich durch den piezoelektrischen Effekt proportional zum Druck.

<sup>1</sup> Es wurde anfangs ein Versuch unternommen, durch Verklebung eines Sensoreingangs den absoluten Druck zu messen. Da die Kalibrationskurven dieser präparierten Drucksensoren eine deutliche Hysterese aufwiesen (bis 15 % des Messbereiches am Nullpunkt, wogegen der vom Hersteller angegebene Wert höchstens 0,2 % betragen soll) wurde beschlossen, die Drucksensoren ausschließlich für die relative Druckmessung zu verwenden.

## 3.2 Der Kalibrationsvorgang

### 3.2.1 Der Zweck der Kalibration

Die ausgesuchten Drucksensoren weisen eine nicht zu vermeidende, technisch bedingte Ungenauigkeit in der Datenausgabe auf. So gibt es laut Hersteller einen eindeutigen linearen Zusammenhang zwischen dem Spannungsausgangssignal  $V_{\text{out}}$  des Sensors und dem Druck, dem der Sensor ausgesetzt ist. Diese Angabe ist jedoch mit einer Toleranz behaftet, die – wenn man sie auf den gesamten Messbereich bezieht – bis 20 % (!) betragen kann. Auch die Festsetzung des Nullpunkts (Offsets), d.h. des Signalwerts, wenn der Sensor keinen Druck erfährt, kann um etwa 10 % von Sensor zu Sensor abweichen [14].

Um diese Ungewissheiten in der Arbeitsweise der Drucksensoren zu beseitigen und deren Präzision eindeutig zu bestimmen, hat man sich entschlossen, jeden Sensor einer eigenen Kalibration zu unterziehen.

### 3.2.2 Verstärkung und Digitalisierung der Ausgangssignale

Das dem Druck proportionale Ausgangssignal  $V_{\text{out}}$  der Sensoren wird mit Hilfe eines geeigneten Analog-Digital-Wandlers (ADC<sup>2</sup>) digitalisiert, d.h. es wird als numerischer Wert (im Folgenden als „digit“ bezeichnet) dargestellt. Bei Verwendung der 8-bit-Auflösung liefert der ADC  $2^8 = 256$  Zahlen von 0 bis 255 bei optimaler Verstärkung auf seinem gesamten Arbeitsbereich. Für den eingesetzten ADC *Motorola MC66HC05B6* ist  $V_{\text{out}}$  zu niedrig, da er erst bei Spannungswerten von ca. 0,5 V reagiert und, um den Digitalisierungsbereich ganz abzudecken, eine Spannung von 5 V benötigt [15]. Daher wird vor dem ADC ein Verstärker eingebaut, der die Ausgangssignale  $V_{\text{out}}$ , bevor sie digitalisiert werden, um einen Faktor ca. 86 verstärkt. Nimmt man an, dass diese Verstärkung nahezu linear verläuft, so ergibt sich für den ADC unabhängig vom Sensortyp ein Digitalisierungsfaktor von etwa 0,018 V/digit. Der Offset befindet sich dann bei 2,25 V und entspricht ca. 130 digit.

### 3.2.3 Prinzip und Durchführung der Kalibration

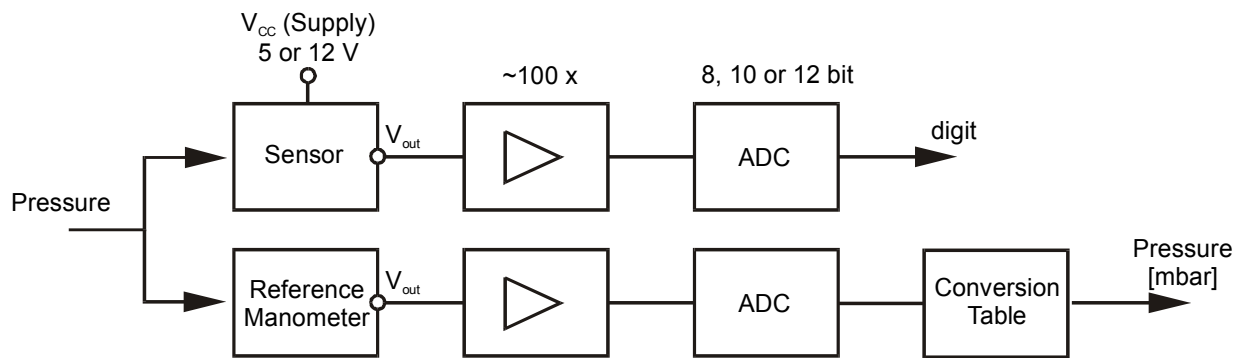
Setzt man die Sensoren und ein Referenzmanometer einem äußeren Druck aus und variiert den Druck so, dass der gesamte Messbereich der Sensoren abgedeckt ist, so findet man einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den digits der zu kalibrierenden Sensoren und den Druckwerten des Referenzmanometers (Abbildung 3.5). In einer Tabelle wird zu jedem der 256 möglichen Zahlenwerte der dazugehörige Druck aus dem Referenzmanometer abgespeichert und bei der späteren Auslese verwendet. Durch den Einsatz dieser Übersetzungstabelle sind Nichtlinearitäten und Nullpunktverschiebungen berücksichtigt.

Die praktische Durchführung der Kalibration lässt sich am bequemsten anhand des in der Abbildung 3.6 dargestellten Schemas erklären:

Mit Hilfe der Vakuum-Pumpe **1** wird bei geöffneten Ventilen **2** und **3** im Behälter **4** Unterdruck erzeugt (min. 0,5 mbar). Nach dem Schließen der Ventile **2** und **3** werden die Ventile **5** und **6** geöffnet. Nun wird der andere Behälter **7** mit Ar/CO<sub>2</sub>-Gas aus der Flasche **8** bis zu einem Überdruck von etwa 2,5 bar gefüllt. Die Ventile **5** und **6** werden dann wieder geschlossen. Den Druck in den beiden Behältern zeigen die Manometer **9** und **10** an.

---

<sup>2</sup> Analog Digital Converter.



**Abbildung 3.5:** Kalibrationsprinzip der Drucksensoren. Der zu kalibrierende Sensor und ein Referenzmanometer werden einem äußeren Druck ausgesetzt. Die Kalibration erfolgt dadurch, dass man jedem ADC-Wert (digit) des zu kalibrierenden Sensors einen durch den Referenzmanometer gelieferten Druckwert zuordnet.

Die zu kalibrierenden Sensoren **11** werden bei geöffnetem Ventil **12** zunächst dem Unterdruck, der sich im Behälter **4** ausgebildet hat, ausgesetzt. Durch das Öffnen des Ventils **13** bzw. **14** wird das Gas langsam aus dem Behälter **7** über ein Leckventil **15** bzw. **16**, das zuvor auf die erforderliche Leckrate eingestellt wurde (typisch: ca. 10 % des Gases pro Stunde), in den Behälter **4** und somit zu den Sensoren fließen. Den momentanen Druck, den die Sensoren erfahren, zeigt ein Referenzmanometer **17** an, das je nach Wahl (siehe unten) absolute oder relative Druckwerte liefert. Ein zusätzliches Referenzmanometer **18** wird für die Messung des Umgebungsdrucks verwendet.

Um die Sensoren zu schützen, d.h. sie einem zu niedrigen bzw. zu hohen Druck nicht auszusetzen, sind die Sicherheitsventile für Unter- und Überdruck angebracht (**19** und **20**). Für die übliche, gleichzeitige Kalibration beider Sensortypen wird das Sicherheitsventil für Drücke von etwa  $\pm 500$  mbar benutzt. Zusätzlich wurde ein Sicherheitsventil für  $\pm 100$  mbar eingebaut. Die Sicherheitsventile können dann durch das Öffnen der Absperrventile **21** bzw. **22** eingesetzt werden. Für die Angleichung der Kalibrationsanordnung an den Umgebungsdruck dient das Auslassventil **23**.

## 3.2.4 Auslese, Auswertung und Verwendung der Daten

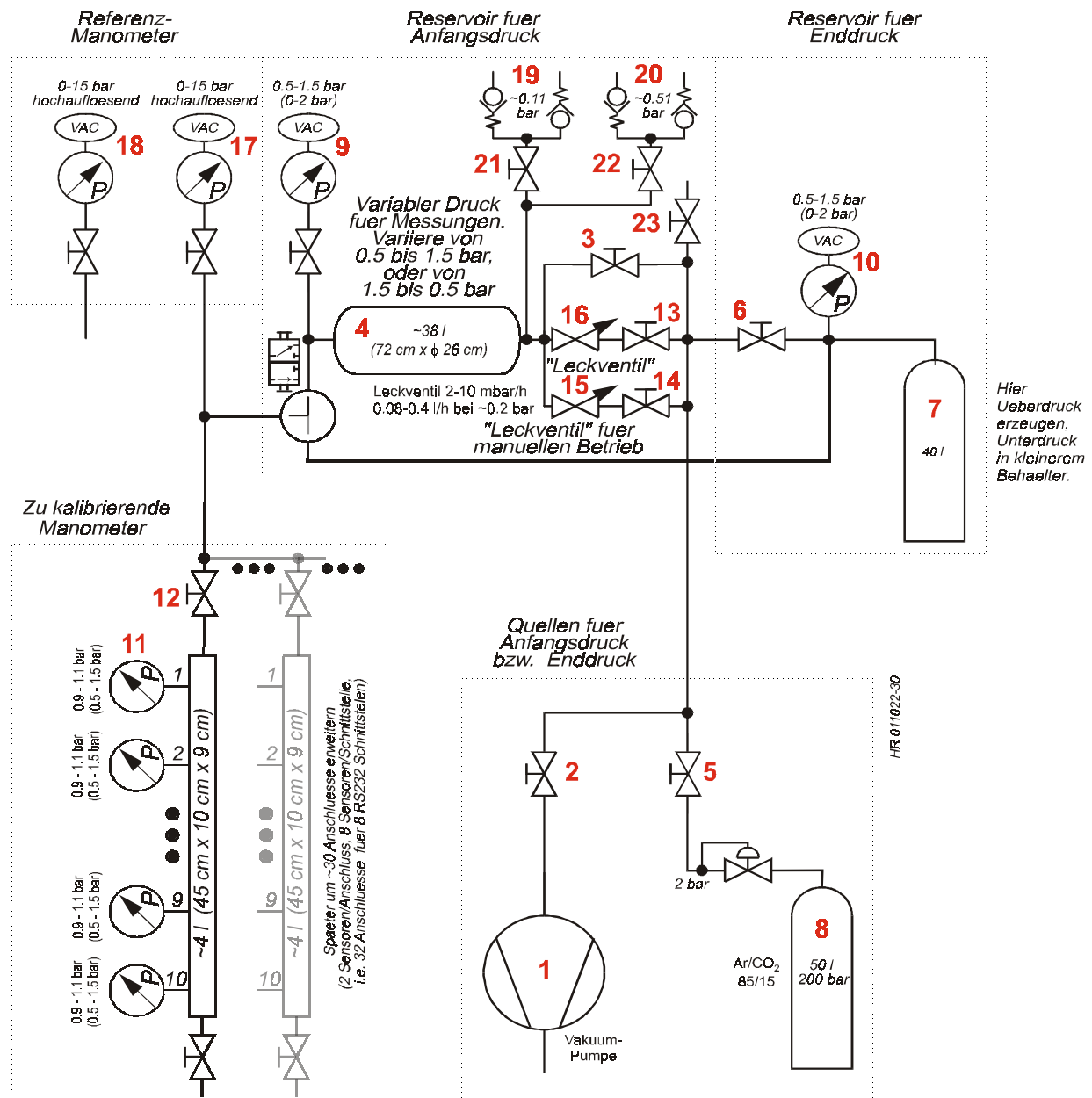
### 3.2.4.1 Referenzdruck

Es gibt drei Möglichkeiten, den Referenzdruck zu messen:

- Mit Hilfe der Kombination Baratron/Multimeter. Von der Firma *MKS Instruments Inc.* werden zwei Geräte des Typs *390 HA-10000SP05* (Baratrons) für jeweils eine absolute und eine relative Druckmessung verwendet. Der Druck verformt hier eine Membran, die zusammen mit ringförmigen, stabilen Palladium-Elektroden einen im Innern der Baratrons befindlichen Kondensator bildet. Über eine Brückenschaltung wird die Änderung der Kapazität mittels der Elektronik-einheiten *270* für Umgebungs- und *270B* für Arbeitsdruck (beide ebenfalls von *MKS Instruments Inc.*) in ein lineares Gleichspannungssignal umgewandelt. Die Höhe des ausgehenden Signals in Volt entspricht genau dem gemessenen Druckwert in bar, mit einer Genauigkeit  $\pm 1$  mbar  $\hat{=}$  1 mV [16]. Die so umgewandelten Druckwerte werden dann durch zwei Multimeter *Voltcraft M-4660A* der Firma *Conrad Electronics* angezeigt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Multimeter über eine serielle Schnittstelle RS 232 per PC auszulesen. Die Multimeter liefern dann direkt den digitalen Spannungswert an den Computer.



### 3. DIE DRUCKSENSOREN FÜR DIE CMS-MYONKAMMERN



**Abbildung 3.6:** Schematische Darstellung der Kalibrationsanordnung: Die Behälter für Anfangs- bzw. Enddruck 4 und 7 werden mit gewünschtem Druck aus den beiden Druckquellen 1 und 8 gefüllt. Durch Öffnen des Leckventils 15 bzw. 16 und des Ventils 12 wird das Gas langsam aus dem Behälter 7 in den Behälter 4 fließen, so dass der gesamte Messbereich der zu kalibrierenden Sensoren abgetastet wird. Die Kontrolle des Drucks erfolgt durch die Manometer 9, 10, 17 und 18 [11].

- Ein bereits kalibriertes portables 4-fach-Manometer *PG4*, das die gleichen Drucksensoren, die für den CMS-Betrieb benutzt werden, beherbergt (siehe Abschnitt 3.2.4.5), kann ebenfalls als Referenzmanometer dienen. Außer visueller Anzeige können hier die Messdaten genauso über eine serielle Schnittstelle durch einen PC ausgelesen und analysiert werden. Der Vorteil der Benutzung eines solchen Manometers besteht darin, dass es bereits Relativdruckwerte liefert (man misst den Referenzdruck nur ein mal). Auch die Handhabung und Bedienung dieses Manometers ist einfacher als die Benutzung der Baratron-Auslese. Der Nachteil liegt bei der niedrigeren Genauigkeit der Ablesung, da hier neben dem Messfehler die Kalibrationsfehler der bereits kalib-



### 3. DIE DRUCKSENSOREN FÜR DIE CMS-MYONKAMMERN

rierten Sensoren in *PG4* hinzukommen (etwa  $\pm 1$  mbar für den Sensor *MPX2010DP*, siehe auch Abschnitt 3.2.4.4).

- Eine weitere, aber bis jetzt nur theoretische Option der Abfrage des Referenzdrucks (Luftdrucks) besteht in der Online-Verbindung über Netzwerk mit der lokalen, sogenannten Wetterstation. Es handelt sich dabei um eine Gruppe von Sensoren, die innerhalb und außerhalb der Halle der Physikalischen Institute der RWTH Aachen angebracht sind und die imstande sind, die atmosphärischen physikalischen Größen wie Druck, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit permanent zu messen. Die Protokollierung dieser Daten erfolgt durch einen an das Netz angeschlossenen PC. Der Vorteil dieser Methode wäre u.a., dass nicht nur Druckwerte, sondern auch die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit synchron ausgelesen werden würden.

Bisher wurden für die Studien die ersten zwei Methoden eingesetzt. Für die zukünftige Massenkali-  
bration werden zur Zeit Vorbereitungen getroffen, die Messungen und Kalibration mit Hilfe eines 16-bit-  
ADCs durchzuführen, um den Betrieb der Sensoren mit 10- bzw. 12-bit-Auslese zu ermöglichen.

#### 3.2.4.2 Ausgangssignale der Drucksensoren (digits)

Um die Sensoren zu kalibrieren, werden sie bisher an eine Auslese- und 8-bit-ADC-Elektronik (genannt Steuercomputer) angeschlossen. Der Steuercomputer ist mit Hilfe einer Software *CCBasic* zunächst so programmiert, dass er über die serielle Schnittstelle die aktuellen digits in Form einer Zeichenkette sendet. Eine Zeichenkette besteht aus einer Folge von Ziffern, die den digits der Drucksensoren gleich sind. Sie wird dann mit geeigneter Software am PC verarbeitet.

#### 3.2.4.3 Datenerfassung und -speicherung

Um die Messdaten zu erfassen und den Kalibrationsvorgang zu protokollieren, wurde mit Hilfe der Entwicklungsumgebung *LabVIEW 6i* ein Programm entwickelt. Bei *LabVIEW* handelt es sich um eine graphische Programmiersprache, d.h. die Programme werden graphisch in Form von Flussdiagrammen erstellt (Blockdiagramme). Für den Benutzer wird eine Benutzeroberfläche Schritt für Schritt gebaut, deren Gestaltung an eine Frontplatte eines Messgeräts mit Knöpfen, Schaltern, Displays etc. erinnert. Die *LabVIEW*-Programme werden daher auch *Virtual Instruments (VI)* genannt.

Bei Verwendung der Software *Gas Calibration v1.1* werden die Messdaten wie die Druckwerte des Referenzmanometers und die digits der zu kalibrierenden Sensoren in regelmäßigen Zeitabständen aufgenommen, die momentanen Messdaten und die Zeit auf dem Bildschirm angezeigt, und die zeitliche Druckänderung jedes Sensors in Form eines Diagramms visualisiert. Alle Daten werden in einer ASCII-Datei protokolliert und somit für die weitere Verwendung zur Verfügung gestellt. Der Dateipfad und Dateiname werden durch die Software automatisch generiert.

Abbildung 3.7 zeigt die Benutzeroberfläche dieses Programms, das für den Fall benutzt wird, wenn als Referenzmanometer das portable 4-fach-Manometer *PG4* mit kalibrierten Drucksensoren dient. Die Bedienung und Beschreibung der Funktionen wird im Anhang A erklärt.

#### 3.2.4.4 Ergebnisse

Die aufgenommenen Daten werden in Form einer Kalibrationskurve dargestellt. Eine Kalibrationskurve der beiden Sensortypen *MPX2010DP* und *MPX2050DP* ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Die Aufnahme wurde mit Hilfe der 8-bit-Auflösung zustandegebracht und ist typisch für alle bereits kalibrierten Drucksensoren.

### 3. DIE DRUCKSENSOREN FÜR DIE CMS-MYONKAMMERN

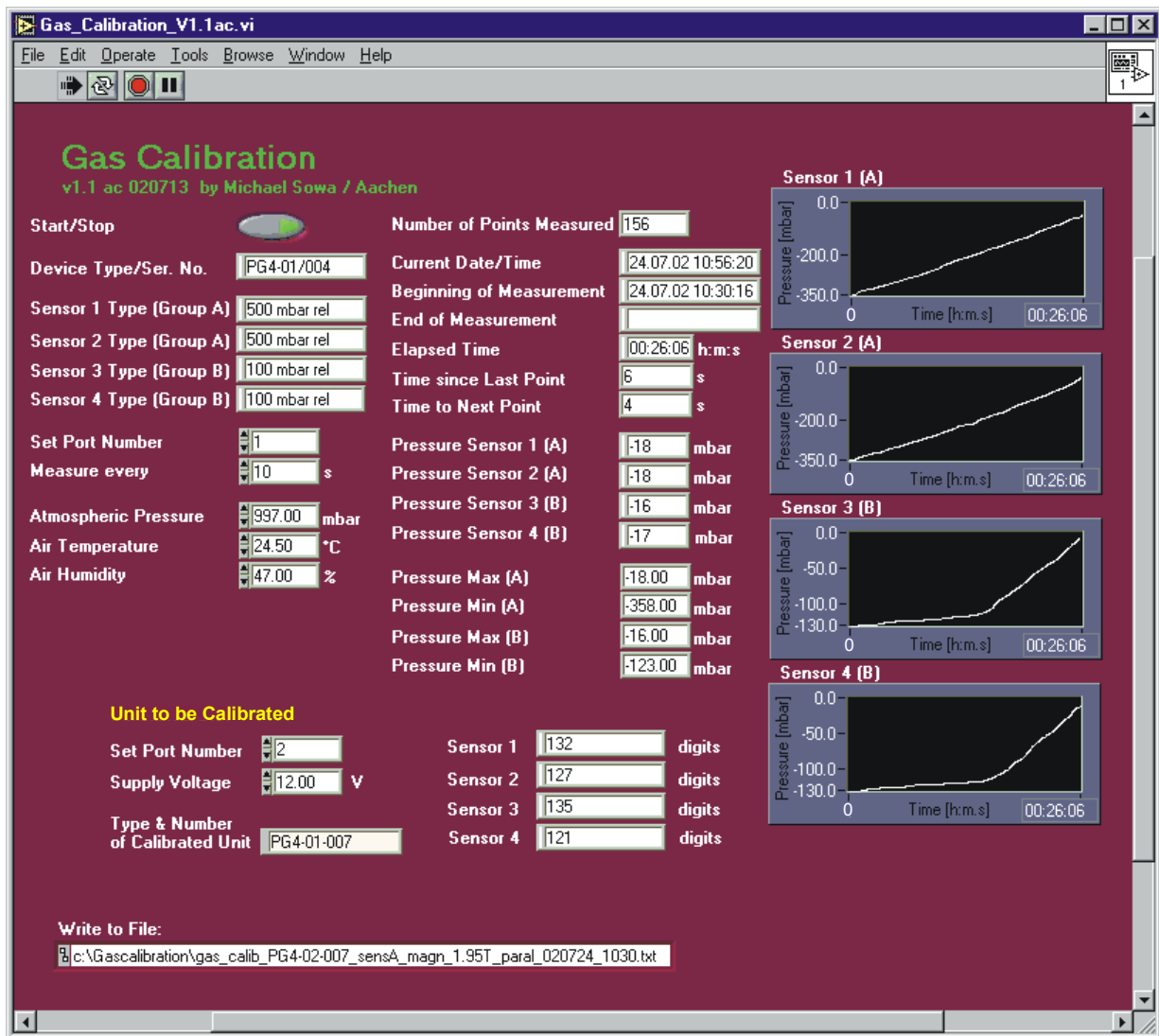
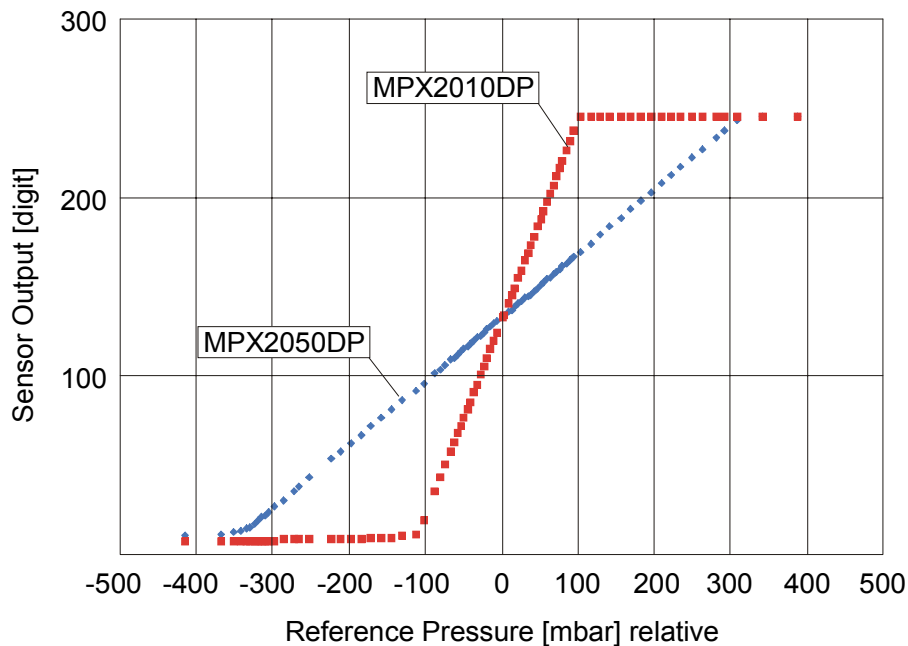


Abbildung 3.7: Benutzeroberfläche der Software *Gas Calibration v1.1*, die für die Kalibration eines portablen 4-fach-Manometers benutzt wird.

Die wichtigsten Merkmale der Kalibrationskurven sind im Folgenden aufgelistet:

- Beide Sensortypen weisen einen linearen Zusammenhang zwischen den digits und den Referenzdruckwerten auf. Während beim Sensor *MPX2010DP* der Linearitätsbereich sich über den Messbereich von etwa  $-100$  bis  $+100$  mbar erstreckt, kann man beim Sensor *MPX2050DP* den linearen Anstieg der Kalibrationskurve erst ab einem Druckwert oberhalb  $-400$  mbar (anstatt  $-500$  mbar) feststellen. Auch eine Sättigung der Kalibration (der maximale digit-Wert bleibt konstant) setzt bereits bei einem Wert unterhalb  $+400$  mbar an. Diese Reduktion des Messbereiches ist durch die vorangestellte Vorverstärkung verursacht und wird zunächst wegen der besseren auf den Messbereich bezogenen Auflösung des Sensors (ca.  $2,8$  mbar/digit anstatt  $4$  mbar/digit) nicht geändert. Die Sensoren vom Typ *MPX2050DP* werden also rein nomenklativ als die Sensoren für den  $\pm 500$  mbar Bereich bezeichnet.
- Die Standardabweichung von dem theoretischen Wert im linearen Bereich (angepassten Geraden) beträgt bei 8-bit-Auflösung bei beiden Sensoren etwa  $0,25\%$  des Messbereiches. Dies bedeutet eine in den Druckwerten ausgedrückte Genauigkeit von etwa  $\pm 2$  mbar für den *MPX2050DP*- und  $\pm 1$  mbar für den *MPX2010DP*-Sensor.



**Abbildung 3.8:** Die Kalibrationskurven der beiden Sensortypen *MPX2010DP* und *MPX2050DP*. Beide Charakteristiken weisen einen linearen Verlauf auf und sind sehr gut reproduzierbar. Der Messbereich des Sensors *MPX2050DP* wird hier durch die Vorverstärkung auf etwa  $\pm 350$  mbar reduziert.

- Mehrere Kalibrationen desselben Sensors ergaben die gleichen Kalibrationskurven. Die Unterschiede in dem Ausgangssignal bei dem gleichen Druckwert betrug hier vereinzelt höchstens  $\pm 1$  digit, so dass die Kalibrationen als reproduzierbar einzustufen sind.

### 3.2.4.5 Verwendung der Drucksensoren – das portable 4-fach-Manometer *PG4*

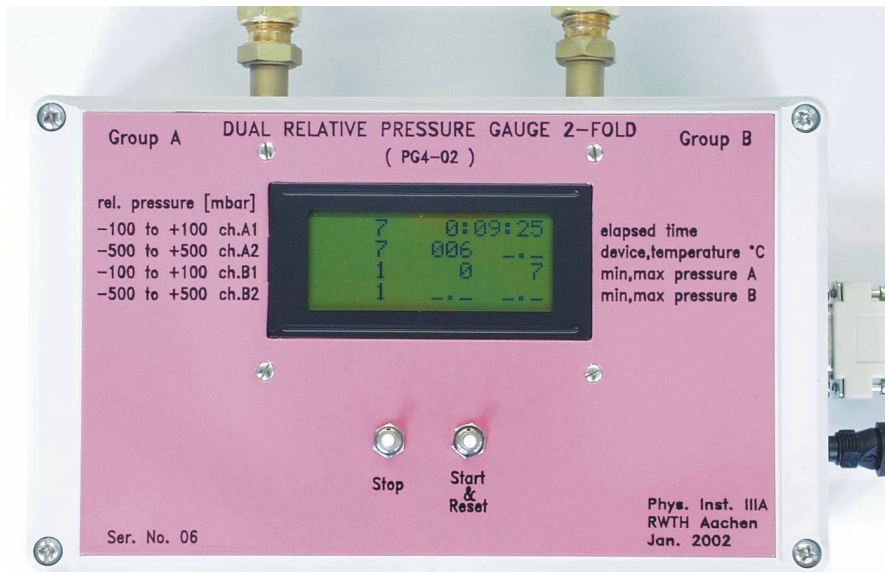
Die bereits kalibrierten Drucksensoren werden in erster Linie für die Tests in den Produktionszentren eingesetzt. Dazu zählen vor allem Gasdichtigkeitstests, Drucktests und die Impedanzmessung. Ebenfalls werden einige Sensoren für die einfache Überwachung des Gasdrucks, dem die Kammern in den Produktionszentren für die Funktionstests (HV-Tests und Tests mit kosmischen Myonen) ausgesetzt werden, benötigt.

Für diese Zwecke wurde im III. Physikalischen Institut A der RWTH Aachen ein portables 4-fach-Manometer *PG4*, das in der Abbildung 3.9 dargestellt ist, entworfen. Es beinhaltet jeweils vier kalibrierte Drucksensoren und die Ausleseelektronik mit integriertem ADC. Das Anzeigefenster zeigt den aktuellen Druckwert jedes Sensors, die verstrichene Zeit seit Anfang der Messung, die Seriennummer des Gerätes, sowie den maximalen und minimalen Druck, dem die Sensoren während einer Messung ausgesetzt wurden, an. Über eine eingebaute serielle Schnittstelle RS 232 ist der Kontakt mit einem PC möglich, so dass die Messung per Rechner aufgenommen und ausgewertet werden kann.

Bis jetzt wurden drei Varianten vom *PG4* gebaut. Für die erste Version wurden alle vier Sensoren für eine Messung vorgesehen (Version *PG4-01*). Danach wurde erkannt, dass es – wie im Fall der Druckmessung an Myonkammern im CMS – eine Messung mit nur zwei Sensoren (ein *MPX2050DP* und ein *MPX2010DP*) genügen sollte. So ist eine andere Version des Messgerätes gebaut worden, in der die vorhandenen vier Sensoren in zwei Gruppen eingeteilt sind, so dass man imstande ist, mit einem Messgerät zwei unabhängige Messungen durchzuführen (Version *PG4-02*, in Abbildung 3.9). Eine dritte Variante besteht darin, dass man für den offenen Eingang aller Sensoren, der bisher dem Atmosphären-

### 3. DIE DRUCKSENSOREN FÜR DIE CMS-MYONKAMMERN

druck ausgesetzt war, einen speziellen Anschluss eingebaut hat, so dass eine relative Messung, die sich nicht auf den Umgebungsdruck bezieht, auch möglich ist.



**Abbildung 3.9:** Das für die Messungen in den Produktionszentren gebaute portable 4-fach-Manometer *PG4*. Man kann mit der in der Abbildung dargestellten Version zwei unabhängige Messungen mit jeweils zwei Sensoren durchführen. Ein Anschluss an den PC ist durch eine serielle Schnittstelle RS 232 bewerkstelligt.

### 3.3 Auflösung der Messkurve und Genauigkeit der Messung

Bis jetzt erfolgte die Kalibration mit Hilfe des 8-bit-ADC, der in den Manometern *PG4* fest integriert ist. Für die Kalibration eines später mit einem 10-bit-Wandler arbeitenden Drucksensors will man eine höhere Auflösung verwenden, um Unsicherheiten aus der Kalibrationsmessung zu minimieren. Es gibt Möglichkeiten, die Güte der mit einer höheren Auflösung aufgenommenen Kalibration zu bestimmen. Für diesen Zweck kann man die zu kalibrierenden Sensoren mit Hilfe einer 12-bit-Datenerfassungskarte, die unter *MS DOS* betrieben werden kann, in regelmäßigen Zeitabständen auslesen und die so gewonnenen Kalibrationsdaten in eine ASCII-Datei speichern.

Ausgelesen wurden also wiederum jeweils zwei Sensoren vom Typ *MPX2050DP* und *MPX2010DP*. Es wurden zwei Messungen mit jeweils anderer Leckrate der Leckventile eingestellt (siehe Abbildung 3.6), so dass die Daten innerhalb desselben Messbereichs von 48 bis 0 mbar einmal langsamer (12 h, 2838 Messpunkte; Messung 1) und einmal schneller (0,5 h, 22 Messpunkte; Messung 2) unter einer Versorgungsspannung von 12 V aufgenommen wurden.

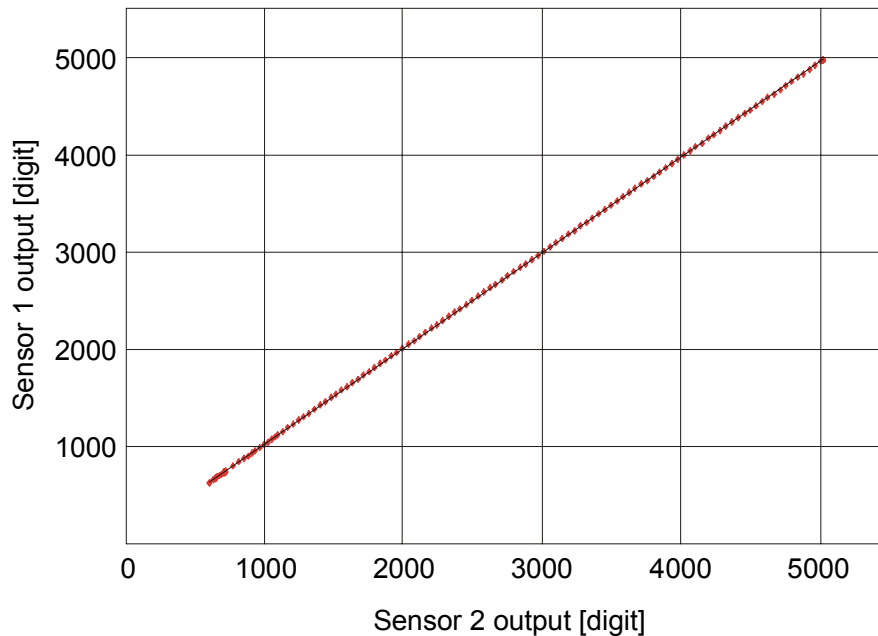
Um ein Maß für die Qualität der Datenaufnahme zu bekommen, wurden die digits eines Sensors *i* gegen die digits eines anderen Sensors *j* in Form eines Diagramms aufgetragen (siehe Abbildung 3.10), die Messwerte an eine Kurve (Gerade) angeglichen, und die Standardabweichung der Messdaten von der angepassten Geraden bestimmt:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2} \quad (3.1)$$

$$i, j = 1, 2, 3, 4; i \neq j$$

Diese Methode, gestützt auf Simultanmessungen mit mehreren Sensoren, hat den Vorzug, dass sie systematische Fehler der zu kalibrierenden Sensoren an den Tag legt, ohne von den Messfehlern des Refe-

renzdrucks beeinträchtigt zu werden. Es entspricht auch der Situation beim späteren Einsatz am Experiment, wo an jedem Punkt der Gasdruck mit zwei Sensoren gemessen wird.



**Abbildung 3.10:** Die Auftragung der Ausgangssignale von zwei Sensoren *MPX2010DP* untereinander, aufgenommen unter 12-bit-Auflösung. Der Vergleich mit der Ausgleichsgeraden zeigt eine deutliche Linearität; die gemessene Standardabweichung von dem Wert der Ausgleichsgeraden beträgt in diesem Fall etwa 0,4 mbar.

Um die Frage zu beantworten, wie sich die Messung unter einer anderen niedrigeren Auflösung auf deren Qualität auswirkt, wurde anhand der bereits unter 12-bit-ADC aufgenommenen Werten eine 10- und 8-bit-Auflösung simuliert. Dafür wurden die bei 12-bit-Auflösung gemessenen digits jedes Sensors in die Integer-Darstellung konvertiert, an der zweiten bzw. vierten Stelle rechts beschnitten, und der so entstandene Wert wieder in die Dezimal-Darstellung gebracht. Auch hier wurden diese Werte gegeneinander aufgetragen, angeglichen und die Standardabweichungen berechnet.

Die erwarteten, nur aus der Digitalisierung resultierenden Standardabweichungen, wurden folgendermaßen berechnet:

- Die Standardabweichungen der Messdaten eines Sensors von der Ausgleichsgeraden sind

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,29 \text{ digit} \quad (3.2)$$

$$x, y = 100, 500 \text{ (Bezeichnung der Sensoren)}$$

- Während der beiden Messungen wurde ein Messbereich von etwa 50 mbar abgedeckt. Die umgerechneten, in Druckeinheiten ausgedrückten und auf den gesamten realen Messbereich ( $\pm 100$  mbar bzw.  $\pm 350$  mbar) jedes Sensors bezogenen Standardabweichungen lauten nun

$$\sigma_{100} = 0,01 \text{ mbar}, \sigma_{500} = 0,05 \text{ mbar (12 bit)}$$

$$\sigma_{100} = 0,06 \text{ mbar}, \sigma_{500} = 0,20 \text{ mbar (10 bit)}$$

$$\sigma_{100} = 0,23 \text{ mbar}, \sigma_{500} = 0,79 \text{ mbar (8 bit)}$$

- Da es sich hier um simultane Messungen handelt, berechnen sich die erwarteten Standardabweichungen von der Ausgleichsgeraden gemäß

### 3. DIE DRUCKSENSOREN FÜR DIE CMS-MYONKAMMERN

$$\sigma_{line} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (3.3)$$

Die Zusammenfassung der gemessenen und der erwarteten Standardabweichung  $\sigma_{line}$  in Druckeinheiten zeigt die Tabelle 3.1.

|                       | Messung 1 |        |       | Messung 2 |        |       | Erwartung |        |       |
|-----------------------|-----------|--------|-------|-----------|--------|-------|-----------|--------|-------|
|                       | 12 bit    | 10 bit | 8 bit | 12 bit    | 10 bit | 8 bit | 12 bit    | 10 bit | 8 bit |
| Sensor 1 vs. Sensor 2 | 0.10      | 0.15   | 0.49  | 0.13      | 0.15   | 0.56  | 0,02      | 0,08   | 0,32  |
| Sensor 1 vs. Sensor 3 | 0.33      | 0.41   | 1.06  | 0.21      | 0.54   | 1.24  | 0,05      | 0,18   | 0,74  |
| Sensor 1 vs. Sensor 4 | 0.27      | 0.35   | 1.09  | 0.27      | 0.39   | 1.01  | 0,05      | 0,18   | 0,74  |
| Sensor 2 vs. Sensor 3 | 0.29      | 0.38   | 1.09  | 0.18      | 0.56   | 1.26  | 0,05      | 0,18   | 0,74  |
| Sensor 2 vs. Sensor 4 | 0.25      | 0.32   | 1.09  | 0.23      | 0.34   | 0.91  | 0,05      | 0,18   | 0,74  |
| Sensor 3 vs. Sensor 4 | 0.27      | 0.43   | 1.64  | 0.22      | 0.66   | 1.60  | 0,06      | 0,24   | 0,97  |

**Tabelle 3.1:** Zusammenfassung der Ergebnisse der Auftragung der Ausgangssignale (in mbar) aller Sensoren untereinander sowie der erwarteten, lediglich von der Digitalisierung stammenden Fehler. Die Zahlen bedeuten die Standardabweichung  $\sigma_{line}$  der Messdaten von der Ausgleichsgeraden. Bezeichnung der Sensoren: Sensor 1, 2: *MPX2010DP*, Sensor 3, 4: *MPX2050DP*. Die Dauer der Messung war 12 h für Messung 1 bzw. 0,5 h für Messung 2. Der Messbereich betrug in beiden Fällen ca. 50 mbar.

Die Ergebnisse lassen sich folgendermaßen interpretieren:

- Beide Messungen lieferten annähernd die selben Resultate. Auf Grund dieser Ergebnisse kann man zunächst feststellen, dass die Qualität der Messung mit besserer Auflösung steigt.
- Obwohl anhand der Ergebnisse der beiden Messungen der richtige Trend in der Genauigkeit der Messung bezüglich der Auflösung gezeigt ist, liegen deren Werte deutlich oberhalb der erwarteten, nur auf Digitalisierung basierenden Standardabweichungen  $\sigma_{line}$ . Dies bedeutet, dass man außer den Digitalisierungsfehlern noch mit anderen Faktoren (ADC, Elektronik etc.) rechnen muss, die die Genauigkeit der Messung beeinflussen können.
- Die gemessenen Standardabweichungen betragen daher bei einer simulierten 8-bit-Auflösung ca. 0,37 mbar für den *MPX2010DP*- bzw. 1,15 mbar für den *MPX2050DP*-Sensor. Das bedeutet, dass bei einer mit einem *MPX2010DP*-Sensor als Referenz und ebenfalls unter 8-bit-Auflösung vorgenommenen Kalibration die erwartete Genauigkeit der späteren Ablesung ca. 0,52 mbar bzw. 1,21 mbar beträgt.

### 3.4 Drucksensoren unter LHC-Bedingungen

Bis jetzt wurden alle Sensoren unter Laborbedingungen untersucht, d.h. ohne die Bedingungen, denen sie im CMS-Detektor ausgesetzt werden, zu berücksichtigen. Man konnte demnach nur Aussagen über deren Arbeit treffen, wenn sie mit einer 12 V Versorgungsspannung gespeist werden und wenn sie keine Wirkung eines Strahlungsfeldes und eines äußeren Magnetfeldes spüren. Deshalb wurden Kalibrationsmessungen der Drucksensoren mit verschiedenen Versorgungsspannungen, im bestrahlten Zustand und unter dem Einfluss eines Magnetfeldes, durchgeführt. Diese wurden dann mit einer Kalibrati-

onskurve derselben Sensoren im idealen Zustand (d.h. bei 12 V Versorgungsspannung bzw. ohne Strahlungs- und Magnetfeld) verglichen.

#### 3.4.1 Charakteristik der nicht stabilisierten Sensoren

Die Versorgungsspannung  $V_{CC}$  der Drucksensoren im Myonsystem sollte lokal stabilisiert werden, da sie die Höhe des Ausgangssignals beeinflusst. Mögliche Schwankungen von  $V_{CC}$  würden daher die Arbeit der Sensoren nicht beeinflussen. Somit wäre nur eine Kalibration der Sensorgruppe nötig.

Offensichtlich gibt es Argumente, die gegen eine Stabilisierung der Sensorspannung sprechen. Im Fall einer Versorgungsspannung von 5 V (empfohlen sind ca. 12 V) bleiben nach der Stabilisierung lediglich ca. 3,8 V für den gesamten Messbereich der Sensoren verfügbar. Eine Stabilisierungselektronik, die aus Elementen wie Spulen besteht, würde bei einem Magnetfeld der Stärke 2 T nicht arbeiten, oder – falls man Kondensatoren einsetzt – würde sie Störpulse generieren können. Die Verwendung der zusätzlichen Elektronik bedeutet, dass man mit zusätzlichen Bausteinen, die ausfallen können, rechnen muss, der Zugang zu ihnen aber – wenn überhaupt möglich – durch die Umgebung im hohen Maße erschwert sein könnte. Nicht zuletzt sei auch darauf hingewiesen, dass die hinzugefügten Komponenten mehr Platz in Anspruch nehmen und mehr Kosten bedeuten würden.

Durch diese Gründe bewegt, hat man in Erwägung gezogen, die Drucksensoren ohne lokale Spannungstabilisierung zu betreiben. Aus Sicherheitsgründen würde dann die Versorgungsspannung lokal durch einen freien ADC-Kanal gemessen. Man würde hier mit keinem Mehraufwand für Elektronik konfrontiert werden, und – falls die Voruntersuchungen der nicht stabilisierten Sensoren positiv ausfallen – sich vergewissern, dass die Druckmessung auch dann funktionieren würde, wenn die Versorgungsspannung  $V_{CC}$  vom nominellen Wert abweicht.

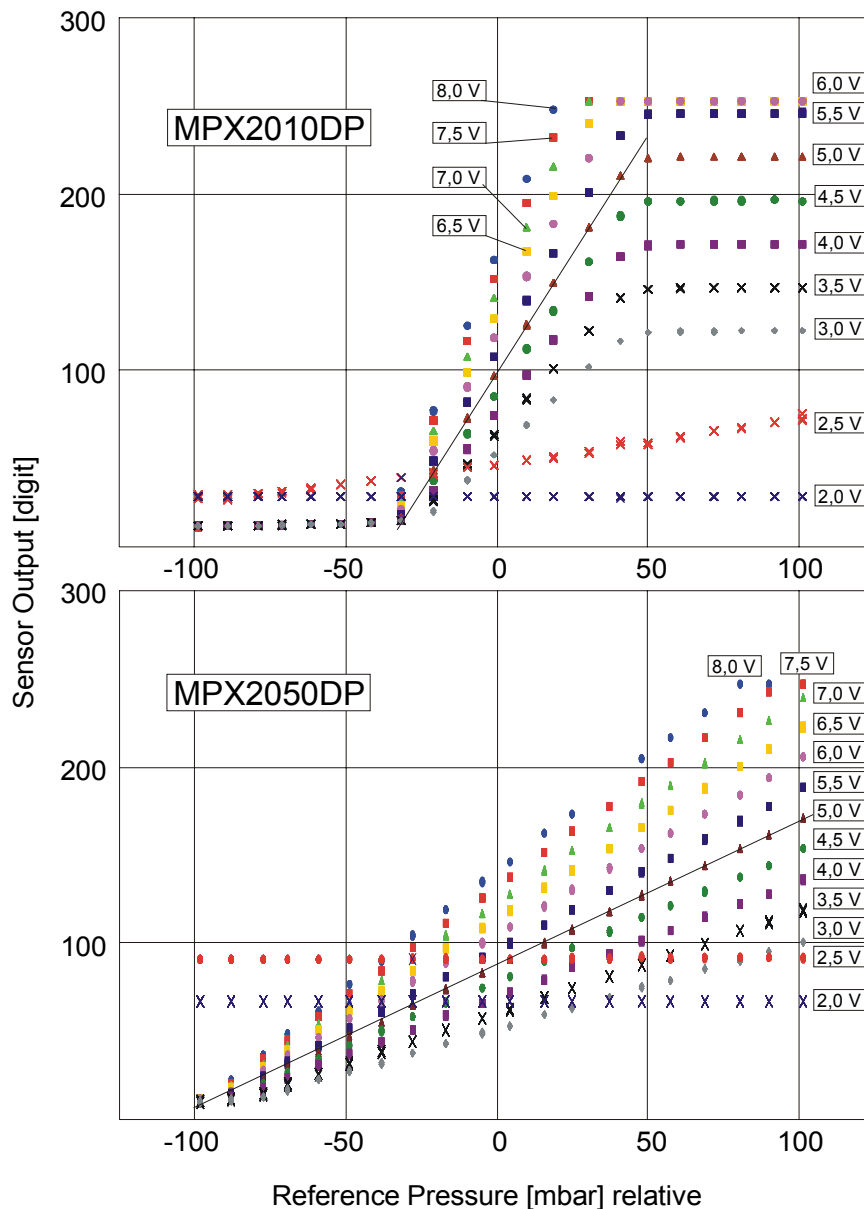
Untersucht wurde eine Sensorgruppe, bestehend aus jeweils zwei Sensoren des Typs *MPX2050DP* und *MPX2010DP*, was den Arbeitsbereichen von jeweils  $\pm 500$  und  $\pm 100$  mbar entspricht. Die Messung bestand darin, die Sensoren bei einem konstanten Druck der variablen Spannung auszusetzen, und für jeden so eingestellten Druck/Spannungswert einige Messpunkte aufzunehmen. Der Druck wurde im Bereich von etwa  $-100$  bis  $+100$  mbar in Schritten zu je 10 mbar eingestellt, und alle Sensoren beim selben Druck vermessen. Bei jedem so eingestellten Druck wurden in einem Spannungsbereich von 2 bis 8 V aufwärts und von 8 bis 2 V rückwärts in Intervallen zu 0,5 V die digits registriert.

Die Ergebnisse der Messung werden im Folgenden diskutiert und sind repräsentativ für ein Sensorpaar, bestehend aus einem Sensor *MPX2010DP* und einem Sensor *MPX2050DP*, mit der Sensorspannung als Parameter in der Abbildung 3.11 dargestellt. Es wurde mit dem 8-bit-ADC gemessen.

- Alle untersuchten Sensoren lieferten sinnvolle Daten bei jedem Druck für den Spannungsbereich 3,0–8,0 V. Bei den Versorgungsspannungen 2,0 und 2,5 V reagierten die Sensoren nicht. Diese Spannungen werden weiter nicht betrachtet.
- Dadurch, dass die Daten eines Messpunktes bei konstantem Druck bei steigender und fallender Spannung wiederholt aufgenommen wurden, konnte man feststellen, ob die Messung reproduzierbar ist. Die Unterschiede bei gleicher Spannung betragen für jeden Sensor unabhängig vom Druck höchstens 1 digit, und bei der Auftragung aller Daten eines Messpunktes betrug die Standardabweichung von der Ausgleichsgeraden höchstens 0,4 digit (Sensor 1, 5 V bei 60 mbar), was mit der Genauigkeit der Digitalisierung verträglich ist.
- Die Charakteristik aller Sensoren ist bei jeder Spannung von 3,0 bis 8,0 V linear (siehe Abbildung 3.11). Die Standardabweichung der Messdaten von der Ausgleichsgeraden betrug ca. 0,6 digits; bezogen auf den Messbereich in allen Fällen maximal 1,08 % (Sensor 1; 3,0 V). Als Beispiel wurden die Standardabweichungen des Ausgangssignals für jede Spannungsreihe des Sensors 1 in der Abbildung 3.12 dargestellt.

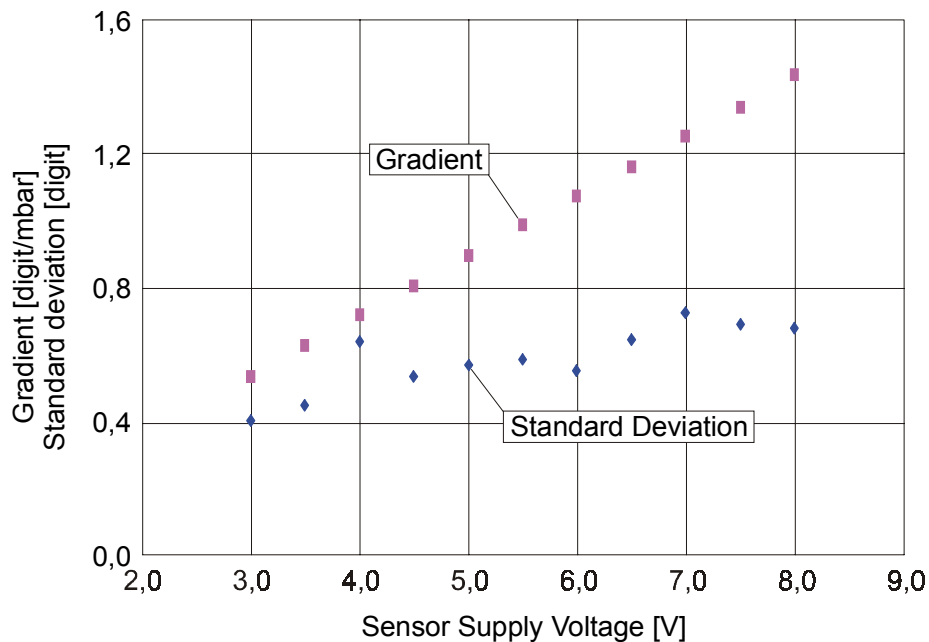
### 3. DIE DRUCKSENSOREN FÜR DIE CMS-MYONKAMMERN

- Das Ausgangssignal der Sensoren ändert sich proportional mit  $V_{CC}$ . Am deutlichsten sieht man es, wenn die Steigung der gewonnenen Charakteristiken in Abhängigkeit von  $V_{CC}$  aufgetragen wird (Abbildung 3.12 für Sensor 1). Somit würde eine Kalibrationskurve, aufgenommen bei einer beliebigen Sensorspannung, genügen, um bei Bedarf die Kalibration bei einer anderen angelegten Spannung durch Umrechnen vorzunehmen.



**Abbildung 3.11:** Charakteristik eines Sensorpaares *MPX2010DP* ( $\pm 100$  mbar Messbereich) und *MPX2050DP* ( $\pm 500$  mbar Messbereich), aufgenommen für verschiedene Sensorspannungen. Bei einer Versorgungsspannung von 2,0 und 2,5 V arbeiten die Sensoren und der Vorverstärker nicht. Der Messbereich beider Sensoren ist durch die vorangestellte Vorverstärkung verkleinert. Die Messkurven des anderen Sensorpaares liefern die gleiche Aussage.





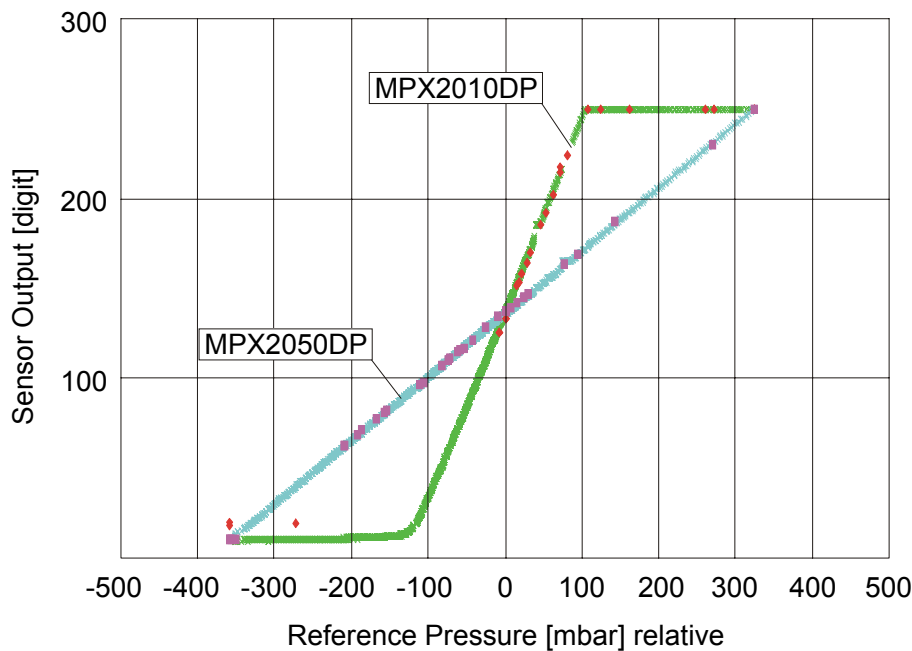
**Abbildung 3.12:** Kalibration eines Drucksensors, hier vom Typ *MPX2010DP* ( $\pm 100$  mbar Messbereich), bei verschiedenen Versorgungsspannungen, dargestellt als Steigung der aufgenommenen Messgeraden sowie Standardabweichung des Einzelpunkts von der Ausgleichsgeraden dieses Sensors in Abhängigkeit von der Sensorspannung. Die anderen Sensoren lieferten ähnliche Diagramme.

### 3.4.2 Die bestrahlten Sensoren

Während des CMS-Betriebs werden der gesamte Detektor und somit auch die Drucksensoren einer Strahlung ausgesetzt. Im vorliegenden Myondetektor sollten vorwiegend die geladenen Myonen nachgewiesen werden, da sie die Filterung durch die vorangestellten massiven Kalorimeter passieren. Einige wenige geladene Hadronen können ebenfalls die Filterung durchqueren. Der Hauptbeitrag zur Trefferrate geladener Teilchen stammt allerdings aus Wechselwirkungen von relativ niederenergetischen Neutronen mit dem Material des Detektors, die über Photonen dann Elektronen und Positronen produzieren. Der Fluss dieser Teilchen kann Werte bis zu  $10 \text{ Hz/cm}^2$  annehmen [9]. Dieser Wert entspricht einer in 10 Jahren LHC-Betrieb bei Nominalluminosität ( $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) erreichten Teilchendichte von etwa  $10^{11}$  Neutronen/ $\text{cm}^2$ , wobei ein Sicherheitsfaktor von 2 schon eingerechnet ist.

Um die Sensoren unter diesen Bedingungen zu testen, wurden jeweils zwei Sensoren vom Typ *MPX2050DP* und *MPX2010DP* am Proton-Synchrotron am CERN an einer für diese Zwecke bestimmten Einrichtung (IRRAD2, [17]) über eine Stunde mit Neutronen bestrahlt, so dass die Teilchendichte sowie das Energiespektrum derjenigen im 10-jährigen LHC-Betrieb gleich. Einen Tag nach der Bestrahlung wurde jeweils ein Sensorpaar, bestehend aus jeweils einem Sensor vom Typ *MPX2050DP* und *MPX2010DP*, vor Ort an ein speziell dafür präpariertes Manometer *PG4-02/007* angeschlossen, dessen Aktivität gemessen (ca. 48 Bq) und einige unter verschiedenen Druckwerten gemessene digits vom Messgerät abgelesen und notiert. Die Referenzdruckwerte wurden von den zwei übrigen, in demselben Manometer bereits eingebauten und simultan messenden unbestrahlten Drucksensoren geliefert (Messung 1, [18]). Im *PG4-02* arbeitete ein 8-bit-ADC. Die Ergebnisse werden in der Abbildung 3.13 in Form einer Kalibrationskurve dargestellt.

### 3. DIE DRUCKSENSOREN FÜR DIE CMS-MYONKAMMERN



**Abbildung 3.13:** Vergleich der Kalibrationskurven eines Sensorpaares vor (grün und türkis) und einen Tag nach der Bestrahlung (rot und violett), die 10 Jahren LHC-Betrieb entspricht. Man sieht bereits anhand der wenigen registrierten Daten, dass die Bestrahlung keinen Einfluss auf die Kalibration hatte. Ähnliche Charakteristiken – hier nicht eingezeichnet – wiesen die beiden anderen bestrahlten Sensoren auf.

Danach wurden die Sensoren zum Produktionszentrum nach Aachen zurückgeschickt, und eine neue Kalibration (etwa eine Woche nach der Bestrahlung) wurde so durchgeführt, dass die Kalibrationsdaten jedes Sensorpaares während einer simultanen Messung registriert wurden (Messung 2). Die gemessene Aktivität der Sensoren konnte vom Untergrund nicht unterschieden werden ( $\approx 0$  Bq). Nach ca. zwei Monaten wurde die Kalibration auf die gleiche Weise wiederholt (Messung 3). Diese beiden Messungen lieferten für jedes Sensorpaar sehr ähnliche Ergebnisse; die Kalibrationskurven einer Messung für jeweils einen Sensor vom Typ *MPX2050DP* und *MPX2010DP* werden exemplarisch in Abbildung 3.14 dargestellt.

Um eine quantitative Aussage zu treffen, wie gut die Drucksensoren nach der Bestrahlung arbeiten, wurde ein ähnliches Verfahren, wie im Kapitel 3.3 dargestellt, angewendet. Es wurden also zunächst die digits jedes Sensors gegen die digits eines jeden anderen, registriert in den beiden Messungen 2 und 3, aufgetragen (siehe Abbildung 3.15) und eine Ausgleichskurve gebildet. Dann werden die Gleichungen der angepassten Geraden bei jeder Messung verglichen und die Standardabweichungen der gemessenen Werte von den Ausgleichsgeraden berechnet.

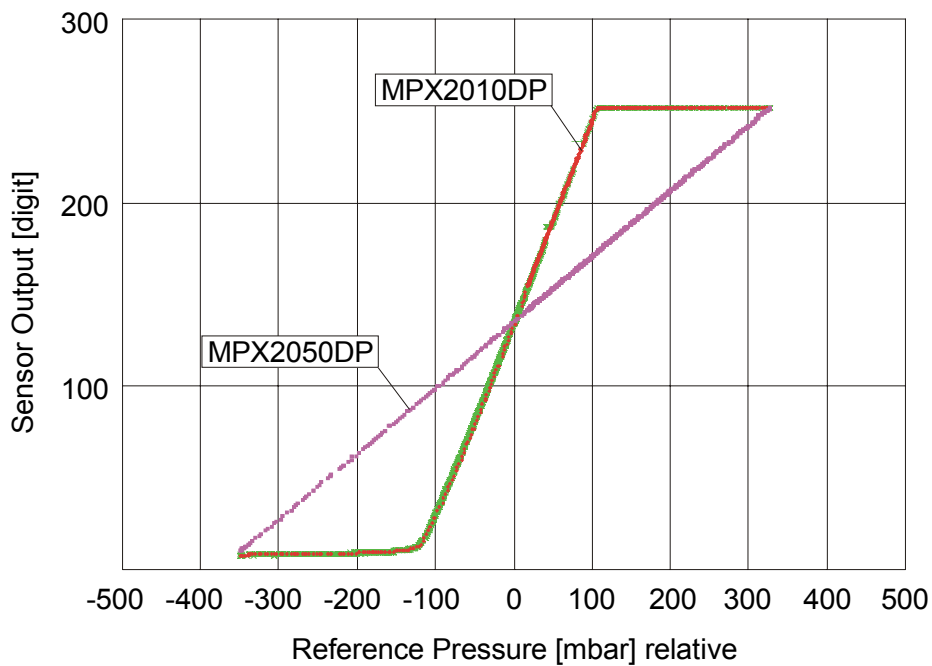
Die Berechnung der theoretischen, nur auf den Digitalisierungsfehlern basierenden Standardabweichungen erfolgte auf folgende Weise:

- Die Standardabweichungen der Messdaten eines Sensors von der Ausgleichsgeraden berechnen sich nach der Formel (3.2). Die Messdaten der Sensoren zeigten einen linearen Verlauf im Messbereich von 203 mbar  $\hat{=}$  221 digit (*MPX2010DP*) und 673 mbar  $\hat{=}$  243 digit (*MPX2050DP*), so dass für die umgerechneten, in Druckeinheiten ausgedrückten Standardabweichungen gilt

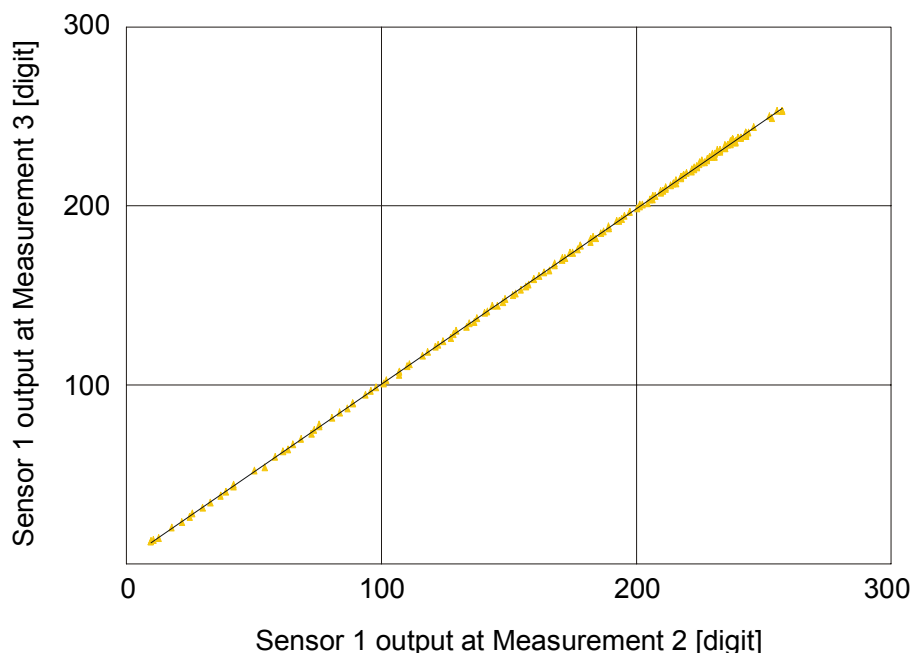
$$\sigma_{100} = 0,27 \text{ mbar}$$

$$\sigma_{500} = 0,80 \text{ mbar}$$

### 3. DIE DRUCKSENSOREN FÜR DIE CMS-MYONKAMMERN



**Abbildung 3.14:** Die Kalibrationskurven der bestrahlten Sensoren, aufgenommen mit Hilfe des Programms *Gas Calibration v1.1* (rot und violett). Man sieht keinen Unterschied im Vergleich zu den Kurven der selben Sensoren, aufgenommen im nicht bestrahlten Zustand (grün und türkis). Die Sensoren wurden mit Hilfe des 8-bit-ADC ausgelesen.



**Abbildung 3.15:** Die Auftragung der Ausgangssignale von einem Sensor *MPX2050DP* gegeneinander, aufgenommen während zwei verschiedener Messungen 2 und 3 (Sensor 500a in der Tabelle 3.2). Die digits entsprechen jeweils den gleichen Referenzdruckwerten. Die Linearität der Kurve ist deutlich zu sehen; die Steigung der Geraden weicht um einige % von eins ab (0,9951) und die Offsetverschiebung liegt unter 1 digit (0,3076). Die gemessene Standardabweichung von der Ausgleichsgeraden betrug in diesem Fall 3,15 mbar.

### 3. DIE DRUCKSENSOREN FÜR DIE CMS-MYONKAMMERN

- Bei den simultanen Datennahmen berechnen sich die Standardabweichungen von der Ausgleichsgeraden laut Formel (3.3). Für die verwendeten Kombinationen 100/500 bedeutet es

$$\sigma_{line}(100/500) = 0,84 \text{ mbar}$$

- Bei den nicht simultanen Datennahmen ist die Formel (3.3) um die Standardabweichungen der Referenzmessungen zu erweitern

$$\sigma_{line} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_{ref1}^2 + \sigma_{ref2}^2} \quad (3.4)$$

Da die Messung mit einem PG4-Messgerät erfolgte, wurde für die Standardabweichung der Referenzmessung diejenige des *MPX2010DP*-Sensors eingesetzt

$$\sigma_{ref1} = \sigma_{ref2} = \sigma_{100} = 0,27 \text{ mbar}$$

Die errechneten Standardabweichungen lauten dann

$$\sigma_{line}(100/100) = 0,54 \text{ mbar}$$

$$\sigma_{line}(100/500) = 0,93 \text{ mbar}$$

$$\sigma_{line}(500/500) = 1,19 \text{ mbar}$$

In der Tabelle 3.2 werden alle Standardabweichungen (theoretisch und gemessen) zusammengefasst. Darüber hinaus wurde das Verhältnis der gemessenen zu den theoretischen Standardabweichungen  $\sigma_{line}(\text{meas})/\sigma_{line}(\text{theor})$  für jede Auftragung eingetragen (in der Tabelle 3.2 kursiv in Klammern dargestellt).

Die Ergebnisse lassen sich folgendermaßen interpretieren:

- Bereits nach der ersten Messung konnte man feststellen, dass die Bestrahlung keine Auswirkung auf die Sensoren hatte. Die einzelnen abgelesenen und notierten Werte liegen sehr wohl auf der vor der Bestrahlung aufgenommenen Kalibrationskurve (Abbildung 3.13). Die geringfügigen Abweichungen von dieser Kurve werden auf die Umstände der Ablese zurückgeführt (keine rechnerunterstützte Datennahme, ein provisorischer Aufbau der Messapparatur etc.).
- Die Auftragung der digits verschiedener bestrahlter Sensoren untereinander aus den Messungen 2 und 3 zeigt eine deutliche Linearität. Vergleicht man bei jedem Sensorpaar die Ausgleichsgeraden der Messung 2 und 3, so stellt man bei diesen Geraden kaum Abweichungen der Steigungen (unterhalb von 1 %) und der Offsets (unterhalb 1 digit) fest (siehe Abbildung 3.15). Allerdings liegen alle in der Tabelle 3.2 aufgeführten Werte für die gemessenen Standardabweichungen  $\sigma_{line}$  im Mittel um den Faktor 3,2 höher als diejenigen aus der Digitalisierung. Es spielen also durchaus außer den Digitalisierungsfehlern weitere Faktoren (Fehler der Sensoren, Elektronik, etc.) eine wichtige Rolle.
- Die bei den simultanen Kalibrationen beider Messungen 2 und 3 gemessenen Werte für  $\sigma_{line}$  sind voneinander nicht merklich unterschiedlich. Das bedeutet, dass die Schwankungen in den Referenzdruckwerten im Vergleich zu den oben genannten Fehlern eine untergeordnete Rolle spielen.
- Die Mittelwerte aller gemessenen Standardabweichungen  $\sigma_{line}$  für jeweils eine Sensorkombination  $x/y$  lauten:

$$\langle \sigma_{line}(100/100) \rangle = 2,08 \text{ mbar}$$

$$\langle \sigma_{line}(100/500) \rangle = 2,94 \text{ mbar}$$

$$\langle \sigma_{line}(500/500) \rangle = 3,23 \text{ mbar}$$

Die Erwartung, dass durch die Verwendung der *MPX2010DP*-Sensoren die Druckmessungen bessere Genauigkeit aufweisen als bei der Verwendung der *MPX2050DP*-Sensoren, hat sich hier nochmals bestätigt.

|           |      | Messung 2          |             |                    |             | Messung 3          |             |                    |             |
|-----------|------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|           |      | 100a               | 500a        | 100b               | 500b        | 100a               | 500a        | 100b               | 500b        |
| Messung 2 | 100a | –                  | <b>0,84</b> | 0,54               | 0,93        | 0,54               | 0,93        | 0,54               | 0,93        |
|           | 500a | <b>2,59 (3,08)</b> | –           | 0,93               | 1,19        | 0,93               | 1,19        | 0,93               | 1,19        |
|           | 100b | 2,10 (3,89)        | 3,51 (3,77) | –                  | <b>0,84</b> | 0,54               | 0,93        | 0,54               | 0,93        |
|           | 500b | 3,15 (3,39)        | 3,66 (3,08) | <b>2,70 (3,21)</b> | –           | 0,93               | 1,19        | 0,93               | 1,19        |
| Messung 3 | 100a | 2,31 (4,28)        | 3,44 (3,69) | 2,19 (4,06)        | 3,08 (3,31) | –                  | <b>0,84</b> | 0,54               | 0,93        |
|           | 500a | 3,09 (3,32)        | 3,15 (2,65) | 3,39 (3,64)        | 2,89 (2,43) | <b>2,50 (2,98)</b> | –           | 0,93               | 1,19        |
|           | 100b | 2,02 (3,74)        | 3,15 (3,39) | 2,13 (3,94)        | 3,04 (3,27) | 1,71 (3,17)        | 2,70 (2,90) | –                  | <b>0,84</b> |
|           | 500b | 2,69 (2,89)        | 3,75 (3,15) | 3,24 (3,48)        | 2,96 (2,49) | 2,55 (2,74)        | 2,38 (2,00) | <b>2,17 (2,58)</b> | –           |

**Tabelle 3.2:** Zusammenfassung der Ergebnisse der Auftragung der Ausgangssignale (in mbar) aller Sensoren paarweise gegeneinander; Messungen bei 12 V Spannungsversorgung. Die Zahlen bedeuten die Standardabweichung der Messdaten von der Ausgleichsgeraden. Oberhalb der Diagonalen wurden die aufgrund der Digitalisierung allein erwarteten Fehler (d.h. idealisierte theoretische Fehler), unterhalb die gemessenen Werte eingetragen. Die Werte in Klammern (kursiv dargestellt), ebenfalls unterhalb der Diagonalen stellen das Verhältnis  $\sigma_{line(meas)}/\sigma_{line(theor)}$  dar. Die Messwerte der simultanen Messungen sind fett markiert. Bezeichnung der Sensoren: 100a, 100b: *MPX2010DP*, 500a, 500b: *MPX2050DP*. Die Bezeichnung (a) und (b) bedeutet jeweils ein Sensorpaar.

### 3.4.3 Sensoren im äußeren Magnetfeld

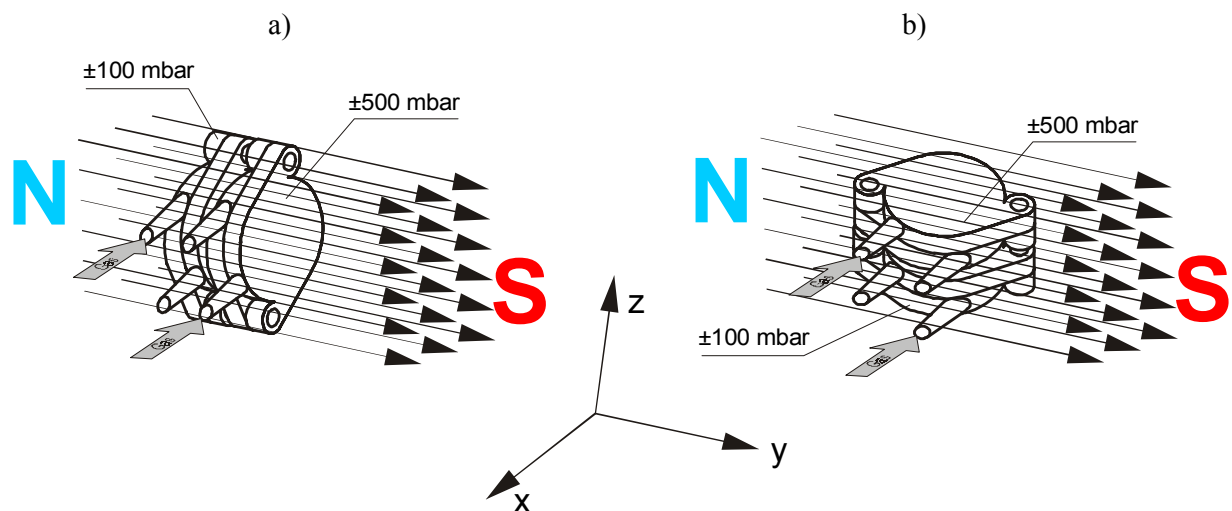
Für den zukünftigen CMS-Detektor werden für jede Myonkammer jeweils zwei Gasverteiler mit jeweils einem integrierten Drucksensor vom Typ *MPX2050DP* und *MPX2010DP* vorgesehen. Einer dieser Verteiler wird direkt am hinteren Rahmenprofil der 128 mm dicken Wabenplatte der Kammer befestigt. Der andere Gasverteiler wird auf der gegenüberliegenden Seite der Kammer aus technischen Gründen am Eisenjoch direkt montiert. Im ersten Fall können die Sensoren ein Magnetfeld von der Stärke bis zu 0,4 Tesla erfahren. Die Magnetfeldstärke, der die Sensoren im Eisenjoch ausgesetzt werden können, kann bis 1,8 T betragen [9]. Die Lage der Sensoren selbst wurde so gewählt, dass deren Membranen senkrecht zum Magnetfeld orientiert bleiben sollen.

Um das Verhalten der Sensoren im äußeren Magnetfeld zu studieren, wurden jeweils ein *MPX2050DP*- und ein *MPX2010DP*-Sensor, die zuvor auf Bestrahlung getestet wurden, zwischen die Polen eines Elektromagneten gebracht. Die Feldstärke dieses Magneten konnte bis zu einem Wert von ca. 2 T variiert werden. Aus Platzgründen konnten die Sensoren zwischen die Polen nur dann eingeschoben werden, wenn sie gegeneinander um 180° um die x-Achse gedreht wurden und sich mit ihren Planflächen berührten. (siehe Abbildung 3.16).

Die so präparierten Sensoren wurden dann an die Gasleitungen und vorab an die Elektronik des Manometers *PG4-02/007* außerhalb des Magnetfeldes angeschlossen. Zusätzlich wurde ein weiteres *PG4*-Manometer außerhalb des Magnetfeldes angebracht, das den Referenzdruckwert lieferte.

Bei der vorgesehenen Position der Drucksensoren in dem Gasverteiler (Abbildung 3.3) wäre das Magnetfeld im CMS-Betrieb senkrecht zur Sensorebene orientiert. Die Sensoren wurden also zunächst in einer Stellung gemessen, die einer solchen beim Detektorbetrieb entsprechen sollte, d.h. die Planflächen der beiden Sensoren waren relativ zu den Magnetfeldlinien senkrecht orientiert (Abbildung 3.16 a)). Bei den Feldstärken 1,95, 1,5, 1,0, 0,5 und 0,0 T (ohne Feld) wurde jeweils eine Kalibrationskurve für den Messbereich von etwa ±400 mbar Relativdruck aufgenommen (Abbildung 3.17). Die Versorgungsspannung der Sensoren betrug 12 V.

### 3. DIE DRUCKSENSOREN FÜR DIE CMS-MYONKAMMERN



**Abbildung 3.16:** Orientierung der Sensoren im Elektromagneten: a) senkrecht; b) parallel zu den Feldlinien.

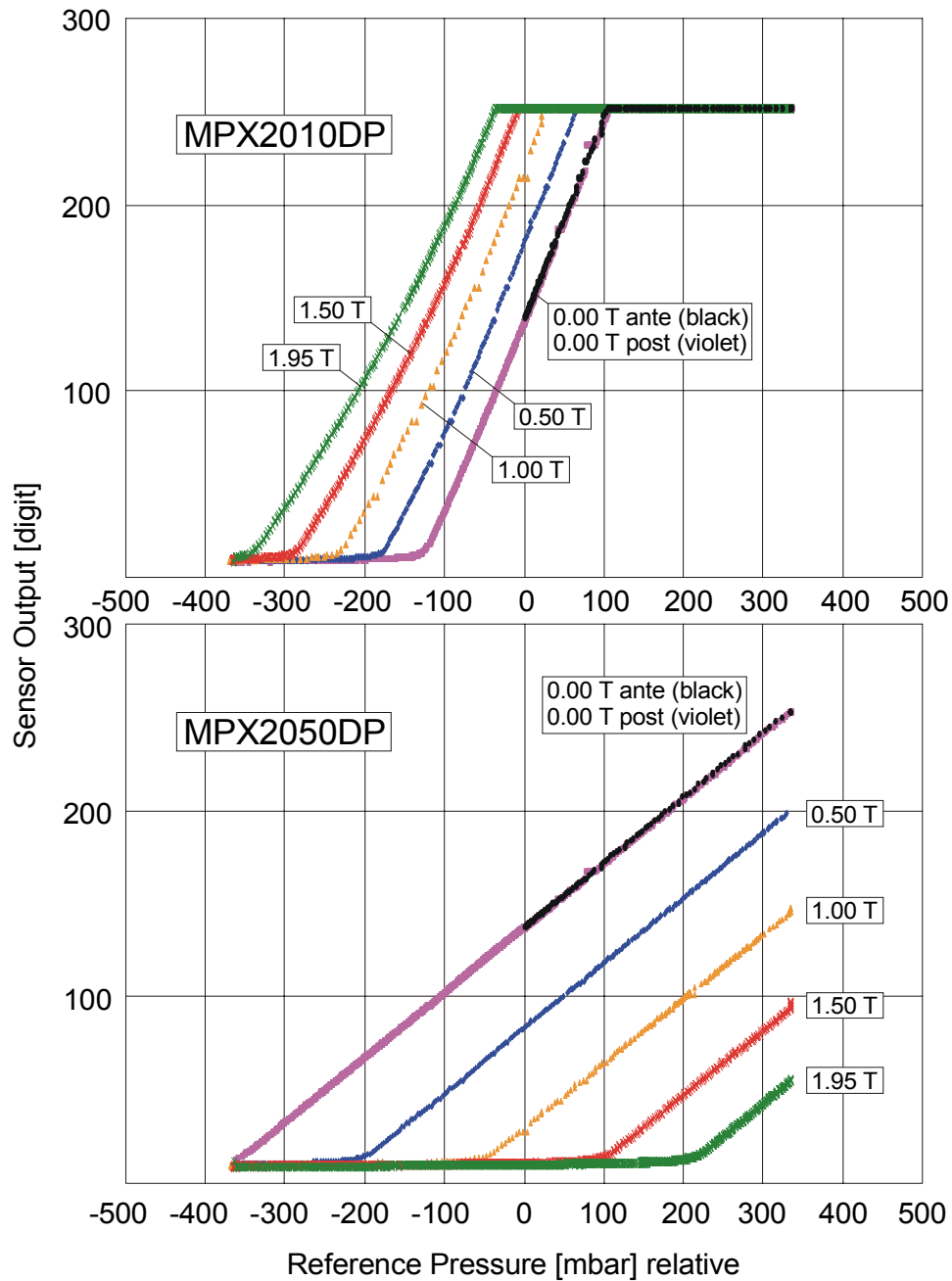
Dann wurden die beiden Sensoren um  $90^\circ$  um die x-Achse gedreht, so dass deren Planflächen parallel zu den Feldlinien waren (Abbildung 3.16 b)). Die Feldstärke, unter der jetzt die Kalibrationskurven für denselben Messbereich registriert wurden, betrug 1,95 T; die Sensoren arbeiteten nach wie vor bei einer Versorgungsspannung von 12 V (Abbildung 3.18).

Schließlich wurden die Sensoren, die sich bereits in der parallelen Position befanden, von dem PG4-Manometer abgekoppelt und an eine Elektronikvorrichtung, die die 5-V-Versorgungsspannung lieferte, angeschlossen. Unter dem Einfluss des Magnetfeldes von der Stärke 1,95 und 1,0 T wurde ebenfalls eine Kalibrationskurve aufgezeichnet (Abbildung 3.19).

Die wichtigsten Erkenntnisse, die man aus der Untersuchung der Drucksensoren im Magnetfeld gewonnen hat, werden nachfolgend dargestellt:

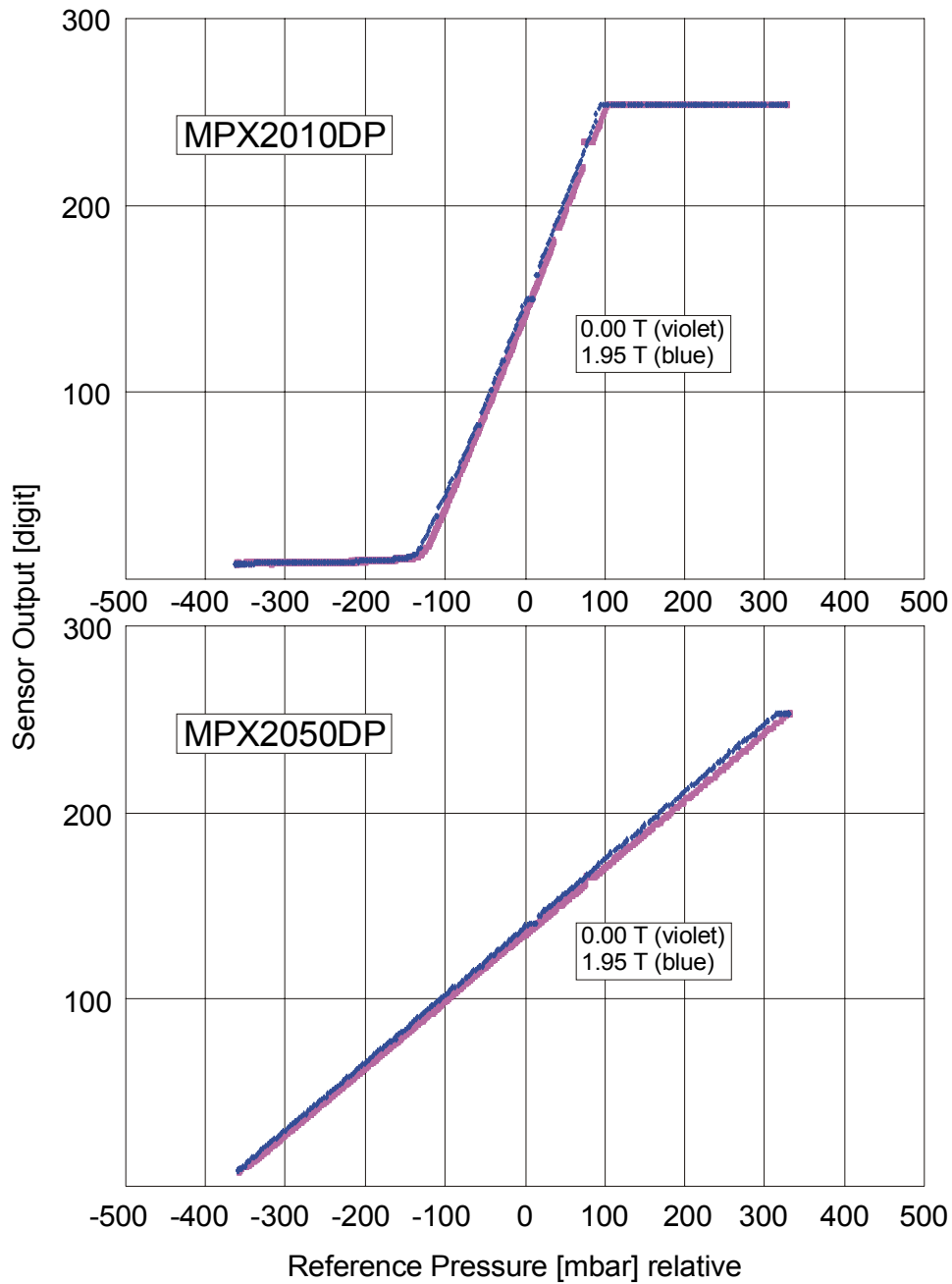
- Falls die Sensoren mit ihren Planflächen relativ zu den Feldlinien senkrecht orientiert sind, hängen die Ausgangssignale von dem angelegten äußeren Magnetfeld ab, und die Kalibrationskurven werden proportional zu dem Feld verschoben (Abbildung 3.17). Die Sensoren können deshalb nicht mit der Orientierung orthogonal zum Magnetfeld im CMS-Detektor bei ca. 2 T eingesetzt werden.
- Die Kennlinien der beiden Sensoren sind in entgegengesetzte Richtungen versetzt. Das ist offensichtlich darauf zurückzuführen, dass die Sensoren (bei Gaszufuhr an der gleichen Stelle) zueinander um  $180^\circ$  um die x-Achse gedreht wurden (Abbildung 3.16) und lässt vermuten, dass die Sensormembran aus magnetischem Material besteht.
- Die Kalibrationskurven bei 0 T, aufgenommen vor und nach der Untersuchung im Magnetfeld, sind gleich. Somit wurde festgestellt, dass keine Hysterese oder gar ein bleibender Schaden der Sensoren durch das Magnetfeld entstanden ist.
- Bei der parallelen Stellung der Sensoren ergibt sich unter dem Einfluss eines Magnetfeldes dieselbe Kalibrationskurve wie im feldfreien Zustand. Eine geringfügige Verschiebung in der Ordinatenrichtung ist durch die Ungenauigkeit der Positionierung der beiden Sensoren zwischen den Polen der Elektromagneten, d.h. falls die Sensoren nicht ideal parallel zu den Feldlinien orientiert sind, bedingt. Eine quantitative Rechnung auf Grund der Ergebnisse von Abbildung 3.18 zeigt, dass ein Unterschied in den Kurven für 1,95 und 0,0 T von im Mittel 4 digits durch einen Winkel  $\alpha$  zwischen den Membrannormalen  $\vec{n}$  und Feldvektor  $\vec{B}$  von ca.  $88,75^\circ$  anstatt

### 3. DIE DRUCKSENSOREN FÜR DIE CMS-MYONKAMMERN



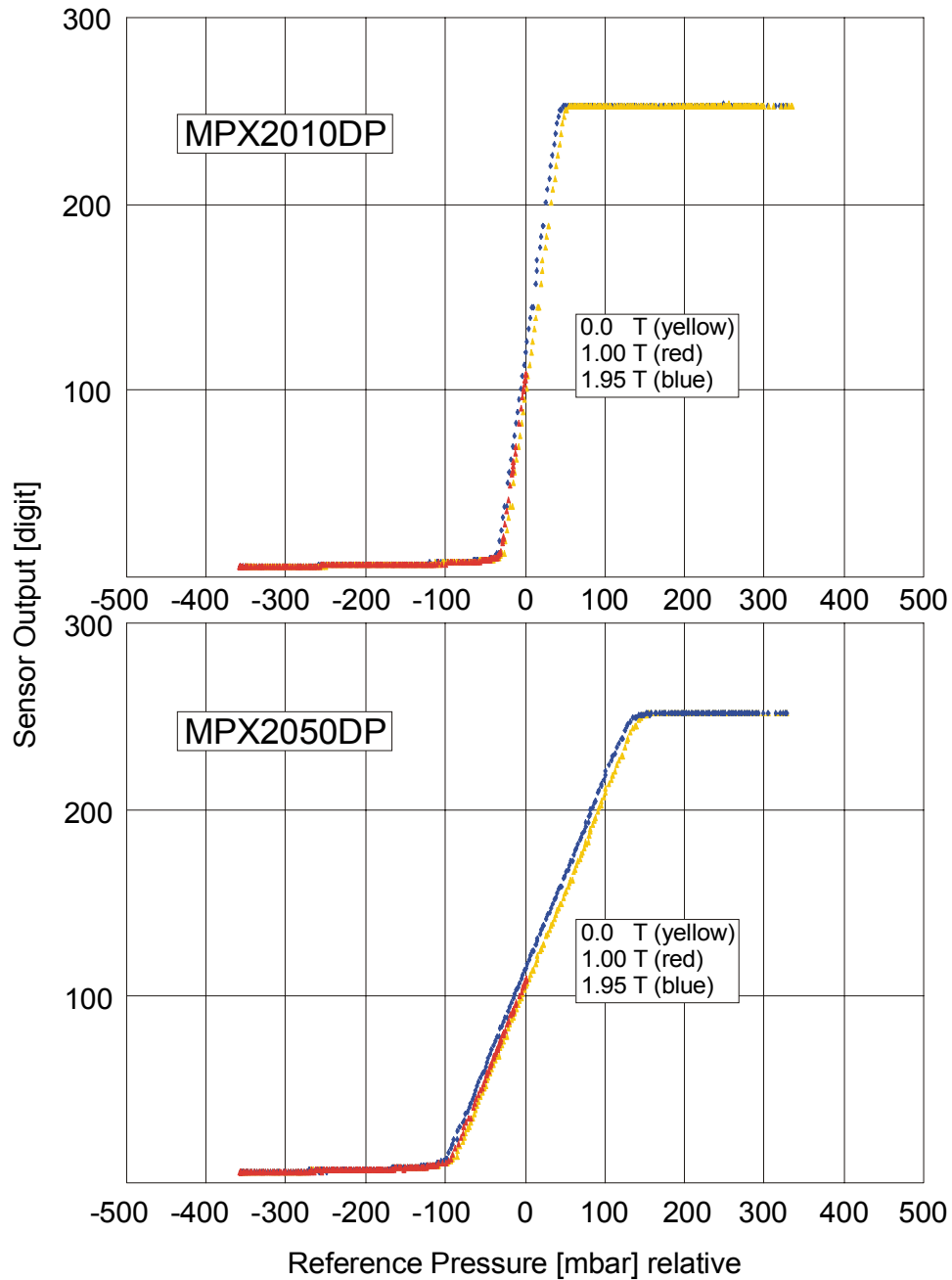
**Abbildung 3.17:** Kalibrationskurven der beiden Sensoren in Abhängigkeit vom äußeren Magnetfeld bei senkrechter Orientierung zu den Feldlinien. Der Einfluss des Magnetfeldes ist proportional zu seiner Stärke, was sich in den äquidistanten Verschiebungen der Kurven zeigt. Die unterschiedliche Verschiebungsrichtung nach links (*MPX2010DP*) bzw. nach rechts (*MPX2050DP*) ist durch die relative Position der Sensoren zueinander verursacht. Die Versorgungsspannung betrug 12 V.

### 3. DIE DRUCKSENSOREN FÜR DIE CMS-MYONKAMMERN



**Abbildung 3.18:** Kalibrationskurven der Sensoren, aufgenommen im äußeren Magnetfeld von ca. 2 T bei paralleler Orientierung zu den Feldlinien. Ein Vergleich mit der ohne äußeres Feld aufgenommenen Kalibrationskurve lässt kaum Unterschiede erkennen. Die Versorgungsspannung betrug hier 12 V.

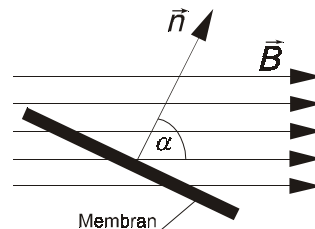




**Abbildung 3.19:** Kalibrationskurven der Sensoren, aufgenommen im äußeren Magnetfeld von ca. 2,0, 1,0 (im halben Messbereich) und 0,0 T bei paralleler Orientierung zu den Feldlinien und unter einer Versorgungsspannung von 5 V. Auch in diesem Fall sieht man kaum Abweichungen der Kurven voneinander. Der tatsächliche Messbereich hängt von der Vorverstärkung ab.

### 3. DIE DRUCKSENSOREN FÜR DIE CMS-MYONKAMMERN

90° (Abbildung 3.20) zu erklären ist<sup>3</sup>. Eine solche Ungenauigkeit von nur 1,25° konnte bei der sehr einfachen Befestigung der Sensoren im Magneten durchaus vorkommen. Daher werten wir die Ergebnisse von Abbildungen 3.18 und 3.19 als Nachweis, dass bei der Orientierung der Sensorfläche parallel zum Magnetfeld (Abbildung 3.16 b)) die Kalibrationskurve unverändert bleibt.



**Abbildung 3.20:** Orientierung der Membran im Magnetfeld. Die Verschiebung der Kalibrationskurven wird als proportional zu  $B \cdot \cos\alpha$  angenommen.

Obwohl man die Sensoren so aufstellt, dass sie womöglich an einem Ort mit sehr geringem Magnetfeld (Kammerrand) und mit der Membran in der Ebene des Magnetfelds (vor allem am Magnetjoch) positioniert werden, kann man mögliche Verschiebungen der Kalibrationskurven durch das Magnetfeld empirisch vor Ort bestimmen: Nach Einschalten des Magnetfelds halte man den Gasfluss kurz an und messe überall den Druck, der bis auf den genau bekannten Höhenunterschied überall gleich ist. Damit kann man kleine Verschiebungen bestimmen und bei den weiteren Messungen berücksichtigen.

- Die Versorgungsspannung beeinflusst die Qualität der Messung im äußeren Magnetfeld bei paralleler Stellung der Sensoren nicht. Die Kalibrationskurven der beiden Sensoren, aufgenommen unter beiden Versorgungsspannungen 12 und 5 V zeigen, dass es in beiden Fällen keinen Unterschied zwischen 2 und 0 T gibt; also dass die Sensoren mit Orientierung parallel zum Magnetfeld sehr wohl sinnvoll betrieben werden können.

---

<sup>3</sup> Es wurde a priori angenommen, dass die Verschiebung der Kalibrationskurven im Magnetfeld proportional zu  $B \cdot \cos\alpha$  ist (Abbildung 3.20). Um die Richtigkeit dieser Behauptung zu überprüfen, müssten weitere Untersuchungen des Sensorverhaltens im äußeren Magnetfeld vorgenommen werden.

## Kapitel 4

# Gastests an den CMS-Myonkammern

### 4.1 Dichtigkeit der Myonkammern

Die Qualität der hergestellten Kammern wird unter anderem an ihrer Gasdichtigkeit gemessen. Die Argumente für eine dichte Kammer – wenn auch die Dichtigkeit der Kammer schon immer a priori angenommen wurde – werden nicht selten als sekundär im Vergleich zu anderen betrachtet. Allein wegen der Vorstellung, dass die Myonkammern im CMS-Experiment unter einem ständigen Gasfluss betrieben werden und dadurch das Gas den Kammern permanent nachgeliefert wird, geraten die Dichtigkeitsmotive öfters in den Hintergrund. Die Bedeutung dieser Problematik wird aber deutlich, wenn man die folgenden Aspekte betrachtet:

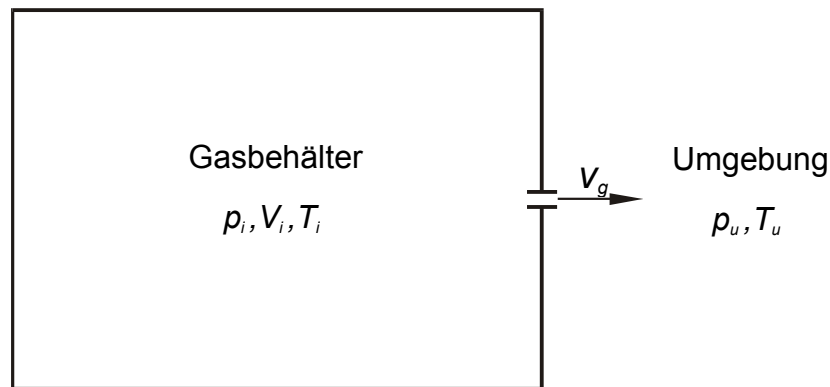
- Das Vorhandensein eines Lecks stellt eine Verbindungsstelle zwischen dem Innenraum einer Kammer und der Umgebung dar. Durch diese Stelle kann also Gastransport stattfinden. Es ist aber zu betonen, dass dieser Transport je nach physikalischen Bedingungen in beide Richtungen erfolgen kann, d.h. es kann unter Umständen Luft in die Kammer angesaugt und somit die Reinheit des Ar/CO<sub>2</sub>-Gemisches beeinträchtigt werden. Dies würde die Pulshöhe und die Driftgeschwindigkeit beeinflussen (siehe Kapitel 6).
- Das Gasgemisch stellt für den Menschen zwar eine nicht giftige Substanz dar, in hohen Konzentrationen ist es jedoch beim Einatmen erstickend. Da es schwerer als Luft ist, kann es sich nach dem Austreten aus den Kammern direkt am Boden der CMS-Halle ansammeln, und – da es farb- und geruchlos ist – für den Menschen als Gefahr nicht sofort erkennbar sein.
- Zu hohe Gasverluste implizieren natürlich das ständige Nachfüllen von Gas. Das ist dann mit größerem Kosten-, Zeit- und Energieaufwand verbunden.

Man beugt daher solchen Problemen vor, indem man die eventuell vorhandenen Leckstellen bereits in den Produktionszentren anhand der Dichtigkeitsmessungen wahrnimmt, sie mit Hilfe geeigneter Suchmethoden lokalisiert und durch Reparaturmaßnahmen eliminiert.

## 4.2 Theorie des Leckvorgangs

### 4.2.1 Ausströmen von Gasen aus Behältern

In einem Gasbehälter von einem konstanten Rauminhalt  $V_i$  befinde sich das Gas unter einem absoluten Druck  $p_i$  (Abbildung 4.1). Die Temperatur des Gases ist  $T_i$ . Durch eine kleine Öffnung  $A$  entströmt das Gas langsam mit der Geschwindigkeit  $v_g$  in die Umgebung, die durch den Druck  $p_u$  und Temperatur  $T_u$  charakterisiert ist.



**Abbildung 4.1:** Gasströmung aus einem Behälter. Entweicht das Gas nur langsam durch eine kleine Öffnung, so kann man die Druckänderung innerhalb des Behälters als isotherm betrachten.

Allgemein kann man den Vorgang im Behälter als isotherm (langsamer Ablauf), an der Leckstelle als adiabatisch (schnelle Durchströmung) betrachten.

Für den absoluten Druck im Behälter gilt

$$p_i = \frac{M_i k T_i}{m V_i} \quad (4.1)$$

$M_i$  – Masse des Gases im Volumen  $V_i$ ;

$m$  – Masse eines Gasmoleküls bzw. -atoms;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$  – Boltzmann-Konstante.

Für die ausströmende Gasmasse gilt an der Mündung

$$\frac{dM_i}{dt} = -A v_g \rho_g \quad (4.2)$$

$A$  – Ausströmquerschnitt;

$v_g$  – Ausströmgeschwindigkeit;

$\rho_g$  – Gasdichte in der Mündung.

Falls also  $T_i = T_u = \text{const}$  ist, so gilt zunächst, wenn man die Formeln (4.1) und (4.2) miteinander kombiniert

$$\frac{dp_i}{dt} = -\frac{k T_i A}{m V_i} \cdot v_g \rho_g = -C_1 \cdot v_g \rho_g \quad (4.3)$$

$$C_1 = \frac{kT_i A}{mV_i} = \text{const} > 0$$

Beide Größen  $v_g$  und  $\rho_g$  hängen vom Druck ab. Laut [19] lassen sie sich für  $p_u/p_i \approx 1$  im Allgemeinen generell nicht explizit analytisch angeben, und es wird empfohlen, den Druckabfall anhand der aufgetragenen Daten durch Messung zu bestimmen<sup>1</sup>. Aus den auf diese Weise gewonnenen Daten lässt sich dann die Zeitabhängigkeit des Drucks in Form einer empirischen Formel bestimmen.

#### 4.2.2 Die Zeitkonstante

Um diese Problematik einfacher darzustellen, wird ein Ansatz gemacht, in dem der Massenfluss der Druckdifferenz  $p_i' = p_i - p_u$  proportional ist

$$\frac{dM_i}{dt} = -C_2 \cdot p_i' \quad (4.4)$$

$$C_2 = \text{const} > 0$$

Diese Annahme ist vor allem dann gerechtfertigt, wenn die Strömung durch die Lecks molekularer Natur ist, d.h. wenn die Zusammenstöße der Gasteilchen untereinander – vorwiegend bei kleinem  $p_i'$  – vernachlässigt werden können [21]. Auch im Fall einer laminaren Strömung wird der Massenfluss gut durch die Beziehung (4.4) wiedergegeben (siehe dazu Kapitel 5.1). Die Konstante  $C_2$  ist dann abhängig von der verwendeten Gassorte sowie von der Leckgröße und -geometrie.

Unter Berücksichtigung der Gleichung (4.1) gilt dann für die zeitliche Druckänderung im Behälter:

$$\frac{dp_i}{dt} = -C_2 \cdot \frac{kT_i}{mV_i} \cdot p_i' \quad (4.5)$$

Nimmt man an, dass der Umgebungsdruck sich während des Strömungsvorgangs nicht deutlich ändert, so gilt

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{d(p_u + p_i')}{dt} = \frac{dp_i'}{dt} \quad (4.6)$$

Fällt der Druck während einer Zeitspanne  $t$  von einem Anfangswert  $p_0$  auf den Endwert  $p_e$ , so gilt nach der Integration der Gleichung (4.5) unter Berücksichtigung von (4.6)

$$p_e = p_0 \cdot \exp\left\{-\frac{t}{\tau_1}\right\} \quad (4.7)$$

mit der Zeitkonstante

$$\tau_1 = \frac{1}{C_2} \cdot \frac{mV_i}{kT_i} \quad (4.8)$$

Die Zeitkonstante  $\tau_1$  stellt ein Maß für die Dichtigkeit der Superlagen bzw. Myonkammern dar.  $\tau_1$  ist im idealen Fall (kein Druckabfall) unendlich groß, im ungünstigsten Fall (sehr schneller Druckabfall) geht sie gegen Null. Eine Superlage bzw. Kammer wird nach [22] als dicht eingestuft, wenn die gemessene Zeitkonstante mindestens 135 min beträgt<sup>2</sup>. Ihre theoretische Berechnung nach (4.8) ist nur dann möglich, wenn man über genaue Informationen über die Anzahl, Beschaffung und Geometrie der Leckstel-

<sup>1</sup> Man kann sehr wohl  $v_g$  und  $\rho_g$  in Abhängigkeit von  $p$  bei adiabatischen Vorgängen theoretisch berechnen. Dies wäre z.B. der Fall, bei dem im Gasbehälter – nicht wie in unserem Fall – ein erheblich höherer Druck als der Umgebungsdruck herrschen würde,  $p_i \gg p_u$  [20].

<sup>2</sup> Bei diesem  $\tau_1$ -Wert werden nur wenige % des Gases bei jedem Umlauf verloren gehen (siehe Abschnitt 4.2.3).

#### 4. GASTESTS AN DEN MYONKAMMERN

len verfügt. Daher erfolgt die Bestimmung der Zeitkonstanten nach (4.7) durch Messung des Druckabfalls in einem Zeitraum  $t$

$$\tau_1 = \frac{t}{\ln \frac{p_0}{p_e}} \quad (4.9)$$

Eine andere Formel für die Zeitkonstante ergibt sich aus den Daten der Firma *Swagelok*, die sich in der Herstellung von Gasarmaturen und -bauelementen spezialisiert hat. Anhand der für Ventile ermittelten empirischen Formeln für Gasflüsse [23]

$$p_e = \frac{p_0}{\left(\frac{t}{\tau_2} + 1\right)^2} \quad (4.10)$$

ergibt sich hier für die Zeitkonstante

$$\tau_2 = \frac{t}{\sqrt{\frac{p_0}{p_e} - 1}} \quad (4.11)$$

Um festzulegen, welcher der beiden Werte  $\tau_1$  bzw.  $\tau_2$  die zeitliche Druckänderung besser beschreibt, wird anhand der gemessenen, in regelmäßigen Zeitabständen abgelesenen Druckwerte eine Kurvenanpassung vorgenommen (siehe Abschnitt 4.4.1).

#### 4.2.3 Die Leckrate

Für die praktischen Zwecke der Bestimmung von Gasverlusten benutzt man häufig den Begriff der Leckrate  $q$ . Betrachtet man die Ausdrücke für  $p$ ,  $V$ , und  $M$  als Druck, Volumen und Masse des gesamten Gases, so wird die Leckrate als die zeitliche Änderung der Größe  $pV$  definiert und ist bei isothermen Vorgängen ( $T = T_u = \text{const}$ ) gleich

$$q = \frac{d(pV)}{dt} = \frac{dM}{dt} \cdot \frac{kT}{m} \quad [\text{mbar} \cdot \text{l/h}] \quad (4.12)$$

Im Innern des Behälters ( $V_i = \text{const}$ ) ändert sich die Gasmasse laut

$$\frac{dM_i}{dt} = - \frac{V_i dp_i}{dt} \cdot \frac{m}{kT}, \quad (4.13)$$

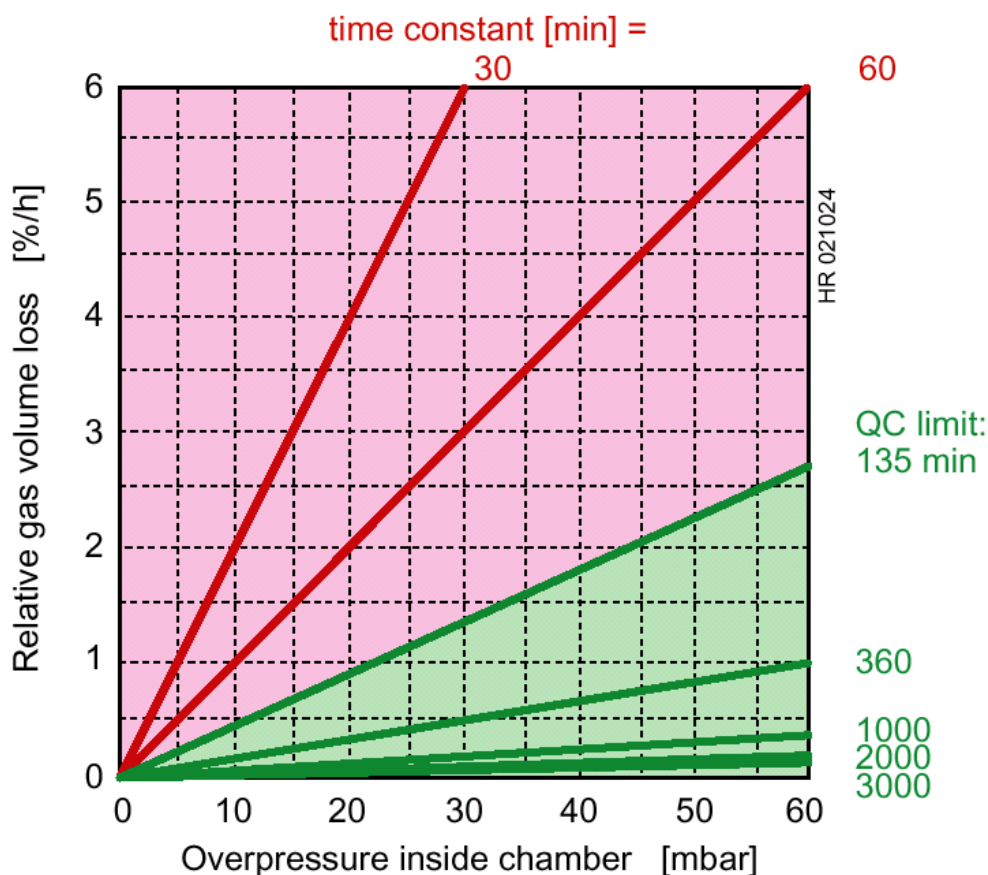
wogegen außerhalb des Behälters ( $p_u = \text{const}$ ) für denselben einfließenden Massenfluss gilt

$$\frac{dM_i}{dt} = \frac{p_u dV}{dt} \cdot \frac{m}{kT} \quad (4.14)$$

Setzt man nun die beiden Gleichungen (4.13) und (4.14) gleich, so ergibt sich unter Einbeziehung der Formeln (4.5) und (4.8) für die volumenbezogene Leckrate

$$q_V = \frac{1}{V_i} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{1}{\tau_1} \cdot \frac{p_i - p_u}{p_u} \quad [\%/h] \quad (4.15)$$

Diese Darstellung der Leckrate als relative Volumenänderung  $q_V$  des Gases wird öfters in den technischen Anwendungen angegeben, da man sie hier mit entsprechenden Geräten (Lecksuchgeräten) direkt messen kann. Sie ist umgekehrt proportional zu der Zeitkonstanten  $\tau_1$ . Abbildung 4.2 zeigt den momentanen relativen Gasverlust in %/h in Abhängigkeit vom Überdruck für einige Werte der Zeitkonstanten.



**Abbildung 4.2:** Relative Volumenänderung (Leckrate) des Gases in Abhängigkeit vom Überdruck für verschiedene Zeitkonstanten [11]. Anhand der aus  $dp/dt$  gemessenen Zeitkonstanten  $\tau_1$  wird der relative Volumenverlust des Gases in %/h berechnet. Kammern mit  $\tau_1 > 135$  min nennen wir dicht; dieser Bereich ist im Bild grün markiert.

Um einen Eindruck zu gewinnen, was die Relation Leckrate/Zeitkonstante für den üblichen Umgang mit den Myonkammern bedeutet, wird das folgende Zahlenbeispiel angegeben:

Mit einer Zeitkonstante  $\tau_1 = 135$  min bei einem typischen Betriebsdruck im Innern einer Myonkammer von  $p_i = 1010$  mbar und dem Aussendruck  $p_u = 1000$  mbar ergibt sich für die Leckrate  $q_V = 0,44$  %/h. Bedenkt man, dass das Volumen einer Kammer ca. 600 bis 1000 l hat (alle Kammern von MB1 bis MB4), so verliert eine Kammer ca. 2,7 bis 4,4 l pro Stunde. Werden die Kammern mit einem typischen Gasfluss von 50 l/h betrieben, so wird in jeder Stunde bei einer Zeitkonstanten  $\tau_1 = 135$  min 5,3 bis 8,9 % des Gases verloren gehen<sup>3</sup>.

### 4.3 Dichtigkeitstests

Sämtliche Kammern bzw. Superlagen werden einem Dichtigkeitstest unterzogen. Das Prinzip dieser Messung besteht darin, dass man das zu testende Objekt bis zu einem gewissen Überdruck mit Gas füllt, es dann absperrt, und die zeitliche Druckänderung (in der Regel Druckabnahme) registriert. Anhand der Stärke des beobachteten Druckabfalls kann man eine Maßgröße (Zeitkonstante) errechnen, sie dann mit

<sup>3</sup> Zum Vergleich: Im CMS-Betrieb wird nach ca. 15 bis 20 Stunden (ein Umlauf) 10 % des Gases erneuert.



#### 4. GASTESTS AN DEN MYONKAMMERN

dem vorgegebenen Sollwert vergleichen, und folglich die getestete Kammer oder Superlage als dicht bzw. undicht einstufen.

##### 4.3.1 Wann wird ein Gasdichtigkeitstest benötigt?

Allein aus praktischen Gründen der Handhabung werden alle Tests (nicht nur Gasdichtigkeitstests) bereits an jeder einzelnen fertiggestellten Superlage vorgenommen (Abbildung 4.3). Sollten dann die Testergebnisse negativ ausfallen, werden an der betroffenen Superlage Reparaturmaßnahmen getroffen, die anderen Superlagen können während dieser Zeit weiter getestet werden. Nimmt man jedoch die Messungen an einer ganzen Kammer vor, so sind es im Fall einer Überarbeitung stets drei Superlagen, aus denen die Kammer besteht, an denen keine Tests durchgeführt werden können. Darüber hinaus kann man an einer gasundichten Superlage keine Hochspannungstests durchführen, und eine nachträgliche Abdichtung ist an vielen Stellen nicht möglich, wenn die Superlage mit Kabeln und Elektronik bestückt ist.



**Abbildung 4.3:** Gasdichtigkeitsmessung an einer einzelnen Superlage. Die Messung erfolgt mit Hilfe des Manometers *PG4*, das über eine serielle Schnittstelle mit einem Rechner verbunden ist. Der zeitliche Druckabfall wird von einem Programm registriert. Anhand dieser Messdaten kann die Zeitkonstante, die ein Maß für die Dichtigkeit darstellt, berechnet werden.



Die Gasdichtigkeitstests werden üblicherweise mindestens zwei mal durchgeführt. Die erste Messung erfolgt bereits nach der mechanischen Fertigung einer Superlage. Sobald also die mechanischen Komponenten zusammengeklebt sind, kann man den Superlagenkörper auf undichte Stellen hin untersuchen. Die beiden offenen Enden der Superlage, an denen später die Hochspannung bzw. Datennahmeelektronik angeschlossen wird, müssen durch dichte Abdeckungen verschlossen werden. Man benutzt für diesen Zweck normalerweise zwei bereitgestellte HV-Deckel, über die die Kammer später mit Hochspannung versorgt wird (1. Messung mit zwei HV-Deckeln).

Ist der erste Test positiv ausgefallen, werden die Superlagen zur elektronischen Bestückung freigegeben. Nachdem eine Superlage mit Elektronik ausgestattet ist, sowie der HV- und der FE-Deckel endgültig an die Superlagen montiert wurden, wird der Gasdichtigkeitstest wiederholt (2. Messung mit HV- und FE-Deckel).

Weitere Dichtigkeitstests werden getätigt, wenn die Superlage erneut geöffnet wird (Reparatur, Überprüfung der Elektronik etc.). Durch das Öffnen und Schließen der Superlage kann es durchaus vorkommen, dass der Deckel inkorrekt angebracht wird (z.B. Einklemmen der Kabel, Abrutschen des Dichtungsringes). Die Dichtigkeit der Superlagen sollte deshalb jedes Mal überprüft werden.

Nicht nur in den Produktionszentren, sondern auch im CERN werden die fertigen Kammern, bevor sie in den CMS-Detektor eingebaut werden, einer Reihe von Funktions- und Qualitätstests unterzogen. Ebenfalls ist die Möglichkeit eingeplant, die in Betrieb genommenen Kammern in den Experimentpausen auf Dichtigkeit testen zu können.

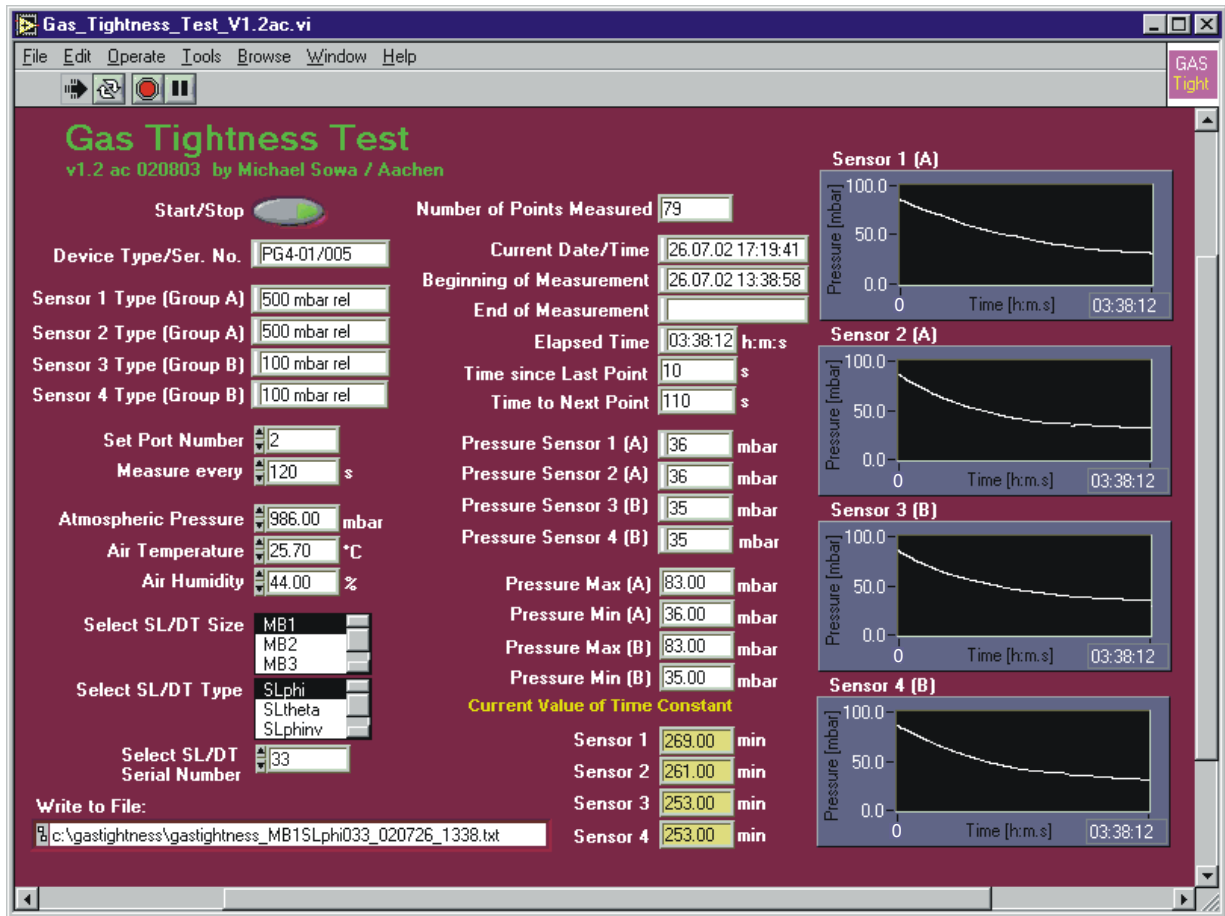
### 4.3.2 Durchführung eines Gasdichtigkeitstests

Wie bereits erwähnt, hängt die Konstante  $C_2$  in den Formeln (4.4) und (4.8), und somit die Leckrate (4.15) u.a. von Eigenschaften des verwendeten Gases ab. Um die Ergebnisse der Messung nicht zu verfälschen und nicht zuletzt wegen der Sauberkeit des Gases, sollte man dafür sorgen, dass, bevor man einen Gasdichtigkeitstest ausführt, sich im Innern der zu testenden Superlage so wenig Luft wie möglich befindet. Deshalb werden die zu testenden Superlagen vor der Messung etwa eine Stunde lang mit Ar/CO<sub>2</sub> unter relativ hohem Fluss (600 l/h) durchgespült.

Nachdem die Superlage mit Gas gespült wurde, wird der Gasfluss auf etwa 100 bis 200 l/h reduziert, der Auslass abgesperrt, und die Superlage weiter mit Gas gefüllt. Der Überdruck, bei dem der Gasdichtigkeitstest beginnt, darf nicht höher als 100 mbar betragen (siehe auch Kapitel 4.5). Die Kontrolle über den Druck in der Superlage erfolgt mit Hilfe des an die Superlage parallel angeschlossenen Manometers *PG4*, das mit einem Computer über eine serielle Schnittstelle verbunden ist. Sobald der gewünschte Druck erreicht ist, wird die Gaszufuhr an der Superlage ebenfalls abgesperrt. Die Initiierung der Messung, Kontrolle und Registrierung der Messdaten erfolgt mit Hilfe des speziell dafür entwickelten, unter *LabVIEW 6i* geschriebenen Programms *Gas Tightness v1.2*, dessen Beschreibung im Anhang B zu finden ist. Das Programm erlaubt, die Messdaten in beliebigen Zeitintervallen abzulesen, sie visuell am Bildschirm darzustellen, und den zeitlichen Druckablauf in Form von Diagrammen anzuzeigen. Für die Protokollierung und Weiterverwendung der Daten werden diese in eine ASCII-Datei geschrieben. Die Benutzeroberfläche (*Virtual Instrument – VI*) von *Gas Tightness v1.2* ist in der Abbildung 4.4 dargestellt. Außer im Produktionszentrum in Aachen werden die Gasdichtigkeitsmessungen mit Hilfe dieses Programms und des *PG-04*-Instruments auch bei Kollaboranten und am CERN getätigt.

Da mit *PG4* nur der relative Druck gemessen wird, kann dieser Wert bei dichten Superlagen bzw. kurzen Messzeiten von Schwankungen des äußeren Drucks beeinflusst werden. Bei kurzen Messungen kann auch die Erwärmung des Gases in den Superlagen den Druckverlust durch Lecks kompensieren und so die Messung verfälschen. Um genaue quantitative Ergebnisse zu erzielen, sollte man daher die Messdauer lang genug wählen, bis ein größerer Druckabfall beobachtet wird. So wird für die 1. und 2. Messung eine Dauer unter zwei Stunden nicht empfohlen. Für die eventuell nachfolgenden, an derselben Superlage vorzunehmenden Dichtigkeitstests, deren Zweck nur der Überprüfung der bereits vorhandenen Messergebnisse (Zeitkonstanten) dient, genügt eine Dauer von ca. 30 Minuten.

#### 4. GATESTS AN DEN MYONKAMMERN

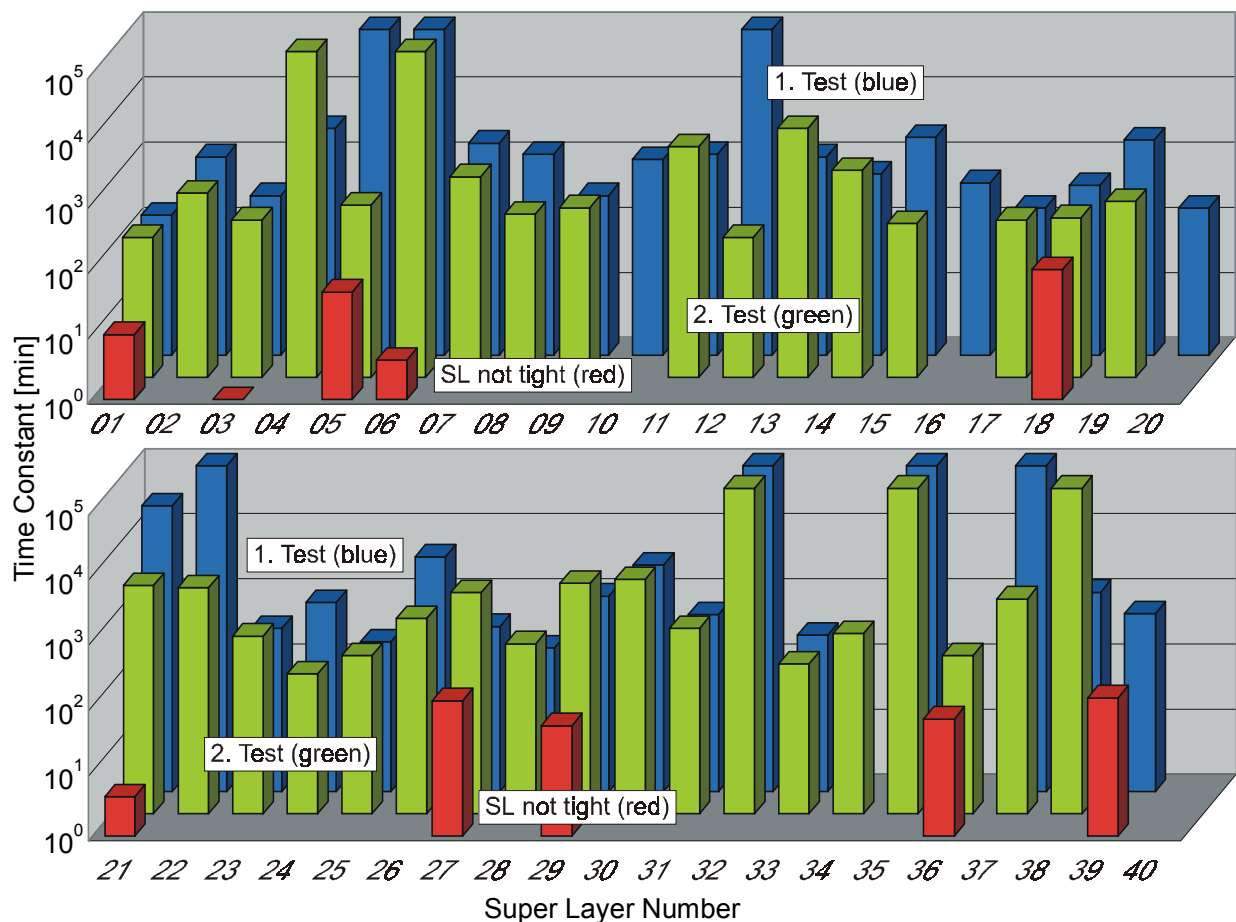


**Abbildung 4.4:** Benutzeroberfläche der Software *Gas Tightness v1.2*, die für die Gasdichtigkeitstests der Myonkammern bzw. von einzelnen Superlagen benutzt wird.

Der Testablauf wird während der Messung automatisch in eine ASCII-Datei gespeichert. Nach Beendigung der Messung werden die Zeitkonstanten jeder Messung in die zu jeder Superlage gehörenden Begleithefte eingetragen. Die Superlagen selbst werden äußerlich durch Anbringung von Aufklebern, die eine Information über den Dichtigkeitszustand der Superlage geben, entsprechend gekennzeichnet (rot  $\hat{=}$  undicht, grün  $\hat{=}$  dicht nach der 1. Messung, blau  $\hat{=}$  dicht nach der 2. Messung).

#### 4.3.3 Die Messergebnisse

Bis Ende Oktober 2002 wurden im Produktionszentrum Aachen 39 Superlagen auf Gasdichtigkeit getestet. An einigen der Superlagen wurde durch die 1. Messung eine Zeitkonstante unterhalb 135 min gemessen. Abgesehen von trivialen Gründen (abgerutschter Abdichtungsring, Fehler beim Montieren von Deckeln etc.) wurden bei manchen Superlagen undichte Stellen an den Klebenähten festgestellt. Nach der Reparatur dieser Superlagen wurde die 1. Messung wiederholt. Bei zufriedenstellenden Ergebnissen wurde dann an den komplett bestückten Superlagen die 2. Messung durchgeführt. Einige Superlagen wurden aus organisatorischen Gründen sofort der 2. Messung unterzogen.



**Abbildung 4.5:** Die nach der Formel (4.9) gemessenen Zeitkonstanten der ersten 39 Superlagen. Die erste Messung (blau) dient zur Überprüfung der Dichtigkeit des mechanisch fertigen Objekts. Die zweite Messung (grün) erfolgt nach kompletter Elektronikbestückung der Superlagen. Zeitkonstanten der Superlagen, die beim ersten Test als undicht eingestuft wurden, sind als rote Säulen dargestellt.

Die Ergebnisse dieser Messungen zeigt die Abbildung 4.5. Bei den Superlagen, an denen beide Messungen vorgenommen wurden, sind die Zeitkonstanten der 2. Messung in der Regel kleiner als diejenigen der 1. Messung. Die Ursachen dafür können in der Beschaffenheit der FE-Deckel liegen<sup>4</sup>.

## 4.4 Validität der Messergebnisse

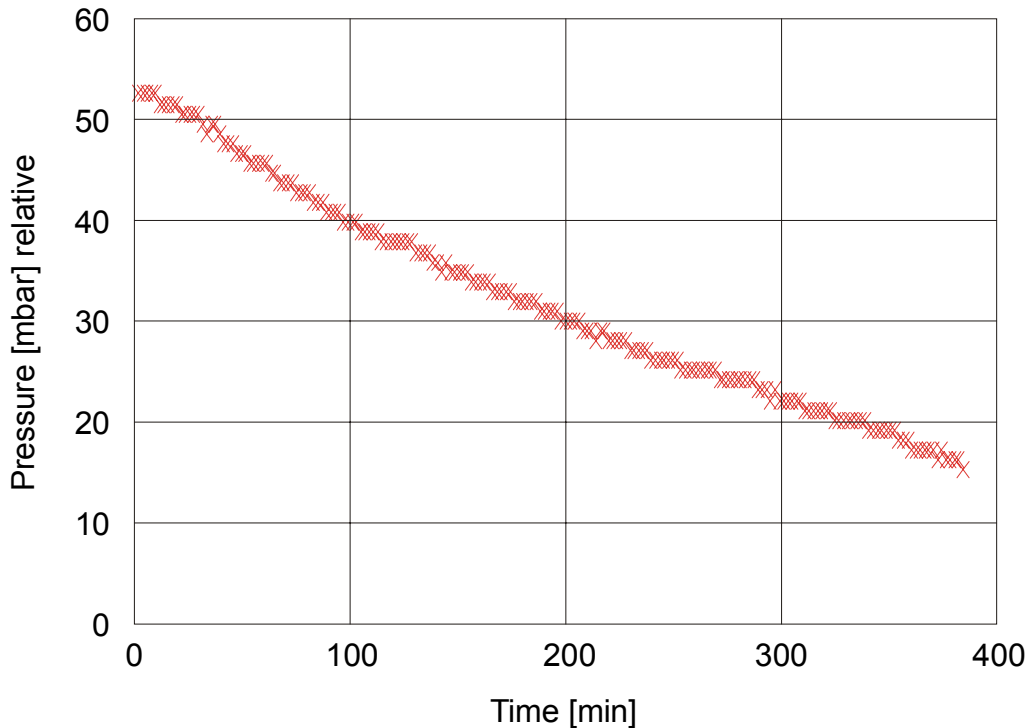
### 4.4.1 Die Messergebnisse und die Zeitkonstante

Bis jetzt wurde als Maß für die Dichtigkeit der Superlagen die nach der Formel (4.9) berechnete Zeitkonstante  $\tau_1$  angenommen. Dies ist nur dann richtig, wenn der zeitliche Druckabfall durch die Gleichung (4.7) gut repräsentiert wird (Abbildung 4.6). Sollte nämlich die Druckänderung während eines Dichtigkeitstests durch eine Kurve dargestellt werden, die einem anderen als durch die Formel (4.7)

<sup>4</sup> An den FE-Deckeln ist eine Reihe von Steckern angebracht, die für die spätere Datennahme bestimmt sind. Die Öffnungen, an denen diese Stecker angeklebt sind, stellen ein erhöhtes Undichtigkeitsrisiko dar.

#### 4. GATESTS AN DEN MYONKAMMERN

beschriebenen Gesetz folgt, so müsste man den alten Begriff der Zeitkonstanten revidieren und die Messergebnisse durch einen neuen ausdrücken.



**Abbildung 4.6:** Eine typische Druckänderung, aufgenommen während eines Dichtigkeitstests (hier Superlage SL 023 mit der nach (4.9) gemessenen Zeitkonstante von 340 min.) mit einem 8-bit-ADC. Um die Gültigkeit des Druckabfallgesetzes zu überprüfen und den Wert der Zeitkonstanten zu verifizieren, wird eine Kurvenanpassung vorgenommen.

Die Validität der gemessenen Zeitkonstanten kann man am besten dadurch überprüfen, indem man anhand der Messdaten eine Kurvenanpassung vornimmt und die Abweichungen der  $N$  gemessenen (in der Regel ca. 100 Messpunkte) und mit dem Digitalisierungsfehler  $\sigma_i$  behafteten Daten  $p_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) von den Ausgleichskurven  $p(t, \tau)$  für den  $\chi^2$ -Test

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(p_i - p(t, \tau))^2}{\sigma_i^2} \quad (4.16)$$

verwendet<sup>5</sup>. Werden solche Anpassungen für verschiedene Gleichungen durchgeführt, so erhält man durch Angabe der Größe  $\chi^2/(N-1)$  Auskunft darüber, welche dieser theoretischen Kurven und welche der Zeitkonstanten die Messung genauer beschreibt.

Dieses Verfahren wurde anhand der Messdaten der Dichtigkeitstests von 30 Superlagen für die beiden Gleichungen (4.7) und (4.10) angewendet (Tabelle 4.1). Neben der Messdauer wurden die Zeitkonstanten  $\tau_1$  und  $\tau_2$  der Kurven aus den Formeln (4.9) und (4.11), sowie deren Fehler, die sich aus der Kurvenanpassung ergaben, angegeben. Die Zeitkonstanten  $\tau_1$  der 1. Messung, die nur mit Hilfe der zwei Messwerte  $p_0$  und  $p_e$  berechnet wurden (d.h. ohne Kurvenanpassung), wurden zum Vergleich in den

<sup>5</sup> Der  $\chi^2$ -Test setzt voraus, dass die Abweichungen des Drucks  $p_i$  von der Ausgleichsgeraden der Gaußverteilung unterliegen. Obwohl dies nicht bei jeder Messung der Fall war (bei sehr dichten Superlagen wurden nahezu keine Schwankungen des Drucks beobachtet), wurde dieses Verfahren auf alle Messungen angewendet. Daraus resultieren einige sehr kleine  $\chi^2/(N-1)$ -Werte in der Tabelle 4.1.

Klammern eingetragen. Neben den Werten der Zeitkonstanten findet man die kursiv dargestellten  $\chi^2/(N-1)$ -Werte. Ausgewertet wurden Daten eines Sensors vom Typ *MPX2010DP* mit 8-bit-Auflösung.

Da man später mit einem höher auflösendem ADC arbeiten wird, stellt sich die Frage, ob man unter einer Auflösung, die höher als 8 bit ist, bessere Kurvenanpassungen erreichen würde. Für diesen Zweck wurden zunächst die Daten der mit dem 12-bit-ADC aufgenommenen Kalibrationsmessung verwendet. Die Messdaten wurden hier von dem an einem Leckventil künstlich erzeugten Druckabfall genommen, so dass man diesen Vorgang als eine simulierte Gasdichtigkeitsmessung betrachten kann. Darüber hinaus konnte man bis jetzt einen Dichtigkeitsstest an einer Superlage (SL 038) mit Hilfe eines 16-bit-ADC vornehmen.

Die Ergebnisse dieser beiden Messungen zeigt die Tabelle 4.2. Hier sind die beiden Zeitkonstanten, ihre Fehler und die entsprechenden  $\chi^2/(N-1)$ -Werte, für deren Berechnung jeweils die Digitalisierungsfehler  $\sigma_i$  des zugehörigen ADC (siehe Kapitel 3.3) eingesetzt wurden, für jeden der an der jeweiligen Messung beteiligten Sensoren eingetragen.

Gemäß der in den Tabellen 4.1 und 4.2 zusammengefassten Ergebnisse sind folgende Schlussfolgerungen zu formulieren:

- Betrachtet man alle 51 unter 8-bit-Auflösung durchgeführten Messungen, deren Zeitkonstanten  $\tau_1$  und  $\tau_2$  endliche Werte haben, so sieht man anhand der  $\chi^2/(N-1)$ -Werte, dass bei 19 Messungen eine deutlich bessere Kurvenanpassung für den exponentiellen als für den quadratischen Druckabfall (Formeln (4.7) und (4.10)) gefunden wurde. Nur bei 6 Messungen wurde der Druckablauf deutlich passender durch die quadratische Formel wiedergegeben. Die übrigen Messungen können etwa gleich gut durch beide Kurven repräsentiert werden.
- Die  $\chi^2/(N-1)$ -Werte bei dem 16-bit-Gasdichtigkeitstest sind ungefähr für beide Kurventypen gleich. Dies ist zu erwarten, da die Messdauer hierfür zu kurz war. Bei diesen Zeitkonstanten hätte man etwa 15 mal länger messen müssen, um auch systematische Abweichungen von den Anpassungskurven und somit merkbare Unterschiede in der Messgenauigkeit wahrzunehmen. Darüber hinaus liegen diese  $\chi^2/(N-1)$ -Werte deutlich höher als diejenigen der 12-bit-Messung. Eine mögliche Ursache dafür konnte darin bestehen, dass der verwendete ADC – durch die angeschlossene Elektronik und Eigenschaften der Drucksensoren – eine unterhalb 16 bit liegende Auflösung liefert. Um dieses Problem zu verstehen, müssten zukünftig weitere Untersuchungen an diesem ADC vorgenommen werden.

Die  $\chi^2/(N-1)$ -Werte der mit 12-bit-ADC registrierten Daten sind unabhängig vom Sensortyp für  $\tau_1$  um eine Größenordnung kleiner als für  $\tau_2$ . Betrachtet man beide Anpassungskurven für diese Messung (Abbildung 4.7), so sieht man deutlich, dass diese Unterschiede hauptsächlich aus den systematischen Abweichungen resultieren.

- Die nach der logarithmischen Gleichung (4.9) durch Kurvenanpassung bestimmten Zeitkonstanten  $\tau_1$  sind etwa von derselben Größenordnung wie diejenigen, die sich nach der Berechnung nur auf Grund des Anfangs- und Enddrucks berechneten Zeitkonstanten ergibt (in der Tabelle 4.1 in Klammern angegeben). Dies gilt insbesondere für die Zeitkonstantenwerte bis ca. 1000 min. Für eine qualitative Aussage genügt es demnach, die Zeitkonstante durch die Angabe des Anfangs-, Enddrucks und der Messdauer zu bestimmen.

Allgemein kann man anhand der vorliegenden Informationen feststellen, dass der bei einem Gasdichtigkeitstest gemessene Druckabfall passend durch die Formel (4.7) beschrieben wird. Die daraus nach (4.9) berechnete Zeitkonstante  $\tau_1$  ist als Maß für die Dichtigkeit einer Superlage oder Myonkammer gut geeignet.

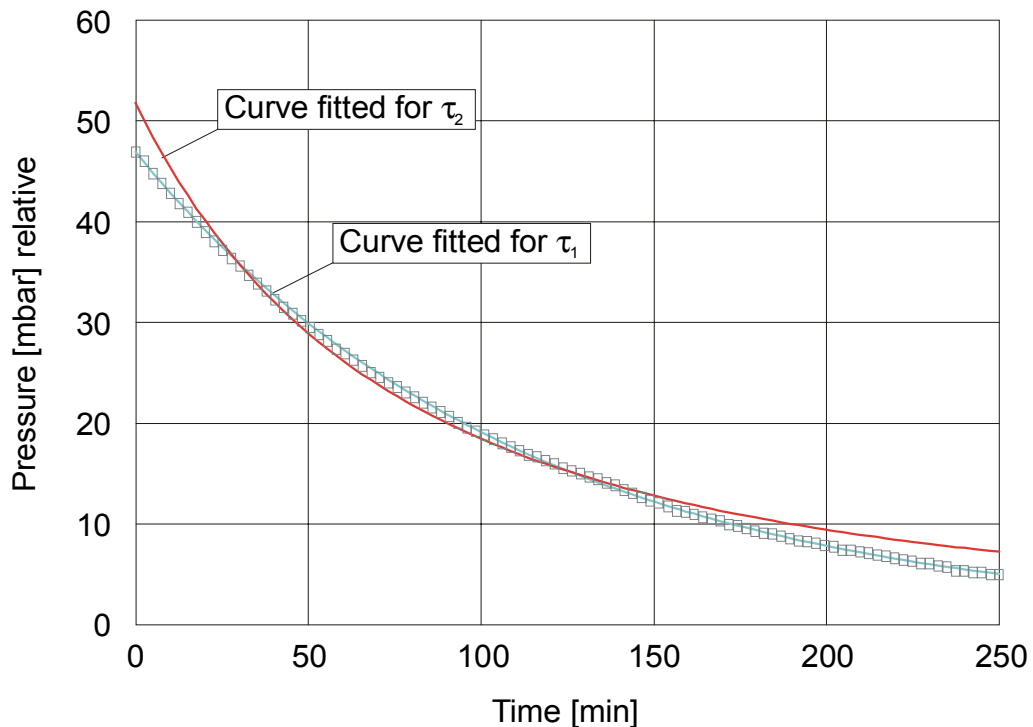
#### 4. GASTESTS AN DEN MYONKAMMERN

| SL<br>Num-<br>ber | 2 x HV                     |                                  |                                  | HV & FE                    |                                  |                                  |
|-------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|                   | Duration<br><i>t</i> [min] | $\tau_1$ [min]<br>$\chi^2/(N-1)$ | $\tau_2$ [min]<br>$\chi^2/(N-1)$ | Duration<br><i>t</i> [min] | $\tau_1$ [min]<br>$\chi^2/(N-1)$ | $\tau_2$ [min]<br>$\chi^2/(N-1)$ |
| 001               | 240                        | 147 ± 5 (140) 0,49               | 235 ± 9 1,77                     | 140                        | 140 ± 4 (140) 1,51               | 228 ± 8 3,22                     |
| 002               | 120                        | 1425 ± 150 (1100) 0,21           | 2794 ± 301 0,21                  | 140                        | 701 ± 43 (670) 0,40              | 1340 ± 86 0,48                   |
| 003               | 180                        | 275 ± 8 (280) 0,51               | 473 ± 16 0,98                    | 140                        | 260 ± 9 (260) 0,64               | 462 ± 18 1,10                    |
| 004               | 120                        | 1137 ± 316 (3000) 0,33           | 2306 ± 634 0,33                  | 110                        | Inf                              | Inf                              |
| 005               | 140                        | Inf                              | Inf                              | 990                        | 602 ± 25 (440) 13,59             | 900 ± 46 26,85                   |
| 006               | 140                        | Inf                              | Inf                              | 1010                       | Inf                              | Inf                              |
| 007               | 160                        | 2155 ± 318 (1800) 0,09           | 4231 ± 636 0,09                  | 140                        | 1949 ± 227 (1200) 0,38           | 3830 ± 454 0,38                  |
| 008               | 140                        | 1196 ± 151 (1200) 0,64           | 2322 ± 302 0,61                  | 1040                       | 391 ± 21 (320) 1,36              | 523 ± 36 17,87                   |
| 009               | 140                        | 282 ± 11 (280) 0,41              | 503 ± 20 0,15                    | 880                        | 418 ± 16 (400) 5,22              | 594 ± 30 20,91                   |
| 010               | 140                        | 1046 ± 97 (1000) 0,10            | 2026 ± 194 0,11                  | –                          | –                                | –                                |
| 011               | 140                        | 1187 ± 137 (1200) 0,39           | 2306 ± 273 0,38                  | 1010                       | 3108 ± 159 (3500) 0,76           | 5737 ± 318 0,60                  |
| 012               | 140                        | Inf                              | Inf                              | 260                        | 162 ± 5 (140) 2,03               | 242 ± 9 12,33                    |
| 013               | 140                        | 1457 ± 172 (1100) 0,25           | 2847 ± 344 0,25                  | 1040                       | 5060 ± 464 (6600) 1,20           | 9617 ± 928 1,10                  |
| 014               | 140                        | 625 ± 38 (600) 0,14              | 1185 ± 75 0,16                   | 150                        | 2248 ± 96 (1500) 1,21            | 4422 ± 188 1,21                  |
| 015               | 140                        | 2451 ± 168 (2200) 0,06           | 4898 ± 272 0,06                  | 140                        | 187 ± 13 (230) 1,01              | 344 ± 27 0,50                    |
| 016               | 140                        | 429 ± 21 (440) 0,94              | 798 ± 41 1,24                    | –                          | –                                | –                                |
| 017               | 580                        | 222 ± 13 (180) 4,22              | 283 ± 21 8,02                    | 360                        | 267 ± 8 (260) 0,46               | 420 ± 17 2,99                    |
| 018               | 290                        | 598 ± 15 (400) 2,43              | 876 ± 29 1,84                    | 280                        | 340 ± 19 (342) 0,26              | 579 ± 38 0,26                    |
| 019               | 940                        | 2112 ± 88 (2000) 3,87            | 3757 ± 175 2,89                  | 660                        | 666 ± 13 (500) 4,86              | 771 ± 25 2,37                    |
| 020               | 500                        | 197 ± 11 (180) 6,35              | 266 ± 18 3,46                    | –                          | –                                | –                                |
| 021               | 660                        | 5228 ± 1176 (24300)<br>0,97      | 10177 ± 2351 0,94                | 120                        | 878 ± 95 (3200) 0,21             | 1698 ± 189 0,21                  |
| 022               | 1520                       | Inf                              | Inf                              | 110                        | 5075 ± 604 (3000) 0,13           | 10102 ± 1209 0,13                |
| 023               | 380                        | 338 ± 8 (320) 0,85               | 531 ± 16 4,25                    | 150                        | 611 ± 41 (540) 0,29              | 1174 ± 81 0,27                   |
| 024               | 210                        | 867 ± 46 (800) 0,44              | 1640 ± 93 0,46                   | 180                        | 141 ± 6 (140) 1,68               | 240 ± 11 2,11                    |
| 025               | 510                        | 212 ± 11 (200) 4,39              | 293 ± 19 25,03                   | 170                        | 274 ± 5 (270) 0,38               | 472 ± 10 1,40                    |
| 026               | 900                        | 1653 ± 243 (4000) 0,75           | 3202 ± 484 0,72                  | 1020                       | 996 ± 27 (1000) 0,94             | 1596 ± 53 2,90                   |
| 027               | 140                        | 288 ± 17 (340) 10,13             | 521 ± 34 9,10                    | 140                        | 3675 ± 441 (2500) 0,16           | 7268 ± 610 0,16                  |
| 028               | 210                        | 186 ± 5 (160) 1,22               | 298 ± 11 4,77                    | 140                        | 409 ± 11 (410) 0,78              | 757 ± 22 1,22                    |
| 029               | 970                        | 912 ± 17 (1000) 3,27             | 1442 ± 34 5,02                   | 210                        | 7112 ± 366 (3500) 0,18           | 14122 ± 732 0,18                 |
| 030               | 210                        | 3218 ± 302 (3000) 0,26           | 6325 ± 604 0,25                  | 220                        | 11473 ± 1361 (4000)<br>0,21      | 22833 ± 2714 0,21                |

**Tabelle 4.1:** Zusammenstellung der durch die Kurvenanpassung der Messdaten nach (4.9) und (4.11) ermittelten Zeitkonstanten  $\tau_1$  und  $\tau_2$ . In Klammern wurden zum Vergleich die nur anhand der zwei Messpunkte (Anfangs- und Enddruck) berechneten Zeitkonstanten  $\tau_1$  angegeben. Ebenfalls zu finden ist die Dauer jeder Messung. Kursiv dargestellt wurden die  $\chi^2/(N-1)$ -Werte ( $N$  – Anzahl der Messpunkte; ist unterschiedlich bei jeder Messung und beträgt in meisten Fällen ca. 100). Die Angaben in den schattierten Feldern bedeuten eine nicht rechnerunterstützte Messung. Alle Daten stammen von einem Sensor vom Typ *MPX2010DP*, und die Aufnahme der Daten erfolgte mit einem 8-bit-ADC.

| ADC                        | Duration<br>$t$ [min] | Sensor Type  | $\tau_1$ [min]<br>$\chi^2/(N-1)$ | $\tau_2$ [min]<br>$\chi^2/(N-1)$ |
|----------------------------|-----------------------|--------------|----------------------------------|----------------------------------|
| <b>16 bit SL 038</b>       | 120                   | 100 mbar     | $1000 \pm 11$ 51,0               | $1940 \pm 18$ 40,79              |
|                            |                       | 500 mbar     | $990 \pm 13$ 49,9                | $1920 \pm 23$ 45,5               |
| <b>12 bit needle valve</b> | 250                   | 100 mbar (1) | $110 \pm 3$ 1,43                 | $146 \pm 5$ 17,3                 |
|                            |                       | 100 mbar (2) | $110 \pm 3$ 1,27                 | $147 \pm 5$ 17,2                 |
|                            |                       | 500 mbar (1) | $113 \pm 3$ 2,28                 | $151 \pm 5$ 41,0                 |
|                            |                       | 500 mbar (2) | $112 \pm 3$ 2,38                 | $150 \pm 5$ 41,0                 |

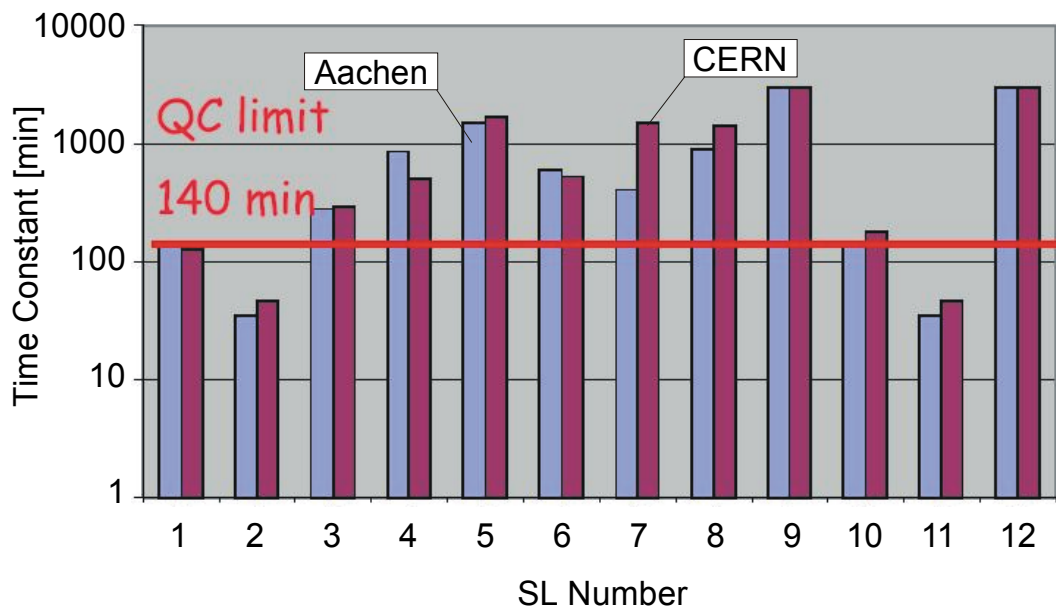
**Tabelle 4.2:** Die Messdauer, Zeitkonstanten und  $\chi^2/(N-1)$ -Werte der beiden Dichtigkeitsmessungen, deren Daten mit einem höher als 8 bit auflösenden ADC aufgenommen wurden. Die Angaben wurden für jeden messenden Drucksensor angegeben. Der Unterschied zwischen den Zahlenwerten von  $\tau_1$  und  $\tau_2$  wird für große Zeitkonstanten als Faktor ca. 2 erwartet (Folge der unterschiedlichen Definitionen).



**Abbildung 4.7:** An die Messdaten (Rechtecke) eines *MPX2010DP*-Sensors angepasste Kurven für beide Zeitkonstanten  $\tau_1$  (blau) und  $\tau_2$  (rot). Die Größe  $\chi^2/(N-1)$  beträgt 1,43 für  $\tau_1$ . Für  $\tau_2$  beträgt sie 17,3 und resultiert aus den im Diagramm sichtbaren systematischen Abweichungen. Gemessen wurde mit Hilfe eines 12-bit-ADC.

#### 4.4.2 Reproduzierbarkeit der Messungen und die Zeitkonstanten bei verschiedenen Anfangsdruckwerten

Wird eine Gasdichtigkeitsmessung unter gleichen Bedingungen an demselben Objekt erneut vorgenommen, so wird die Reproduzierbarkeit der Messungen überprüft. Als Beispiel vergleiche man die Ergebnisse der Dichtigkeits tests an zwölf kompletten Superlagen, durchgeführt zunächst im Produktionszentrum Aachen, und dann ein paar Monate später nach Lieferung der aus diesen Superlagen zusammengesetzten Myonkammern im CERN (Abbildung 4.8).



**Abbildung 4.8:** Die Zeitkonstanten  $\tau_1$ , gemessen bei zwei Dichtigkeits tests an zwölf Superlagen, einmal in Aachen (blau) und dann im CERN (violett) [24]. Der Vergleich der Ergebnisse lässt die Aussage zu, dass die Messungen reproduzierbar sind. Gemessen wurde mit Hilfe eines 8-bit-ADC. Die Nummerierung der Superlagen entspricht nicht derjenigen in Abbildung 4.5 bzw. in der Tabelle 4.1.

Des weiteren will man Gewissheit darüber haben, dass der Wert der Zeitkonstanten nicht von dem Anfangsdruck abhängt. Nimmt man an, dass die Druckänderung dem durch die Gleichung (4.7) beschriebenen Gesetz folgt, so würde es genügen, die für die Ermittlung der Zeitkonstanten erforderliche Kurvenanpassung für jeden beliebigen Abschnitt des Messbereichs vorzunehmen, bzw. für eine grobe Berechnung der Zeitkonstanten jeden beliebigen Messwert als Anfangsdruck zu definieren.

Um das zu überprüfen, wurden fünf Gasdichtigkeits tests an der mechanisch fertigen Superlage SL 018 vorgenommen (1. Messung). Die Anfangswerte des relativen Drucks  $p_0$  betragen der zeitlichen Reihenfolge nach ca. 20, 50, 80 und dann wieder 50 und 20 mbar. Durch die zunächst steigenden und dann fallenden Werte  $p_0$  konnte man feststellen, ob eine Erhöhung des Drucks eine eventuelle Auswirkung auf die Festigkeit der Superlage hätte und somit den Wert der Zeitkonstante beeinflussen könnte. Die Dauer jeder Messung betrug mehrere Stunden; es wurde mit dem 8-bit-ADC gemessen. Die Messergebnisse sind durch die nach (4.9) gemessenen Zeitkonstante  $\tau_1$  in der Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Die Ergebnisse werden folgendermaßen interpretiert:

- Die Zeitkonstanten, gemessen bei den Dichtigkeits tests an denselben Superlagen in Aachen und im CERN, weichen in den meisten Fällen unwesentlich voneinander ab. Nur bei einer Superlage (SL 7 in der Abbildung 4.8) ist der Unterschied in den  $\tau_1$ -Werten merklich größer (Faktor ca.



2). Basierend auf diesen und anderen Ergebnissen, die sich bei wiederholten Messungen ergeben haben und hier nicht weiter beschrieben werden, kann eine gute Reproduzierbarkeit der unter gleichen Bedingungen (Anfangsdruck, Messzeit, Umgebung etc.) durchgeführten Gasdichtigkeitstests festgestellt werden.

- Bei den fünf unter verschiedenem Anfangsdruck durchgeführten Dichtigkeitstests der Superlage SL 018 liegen die Zeitkonstanten in derselben Größenordnung und betragen im Mittel etwa 360 min. Die bei 80 mbar Anfangsdruck gemessene Zeitkonstante ist um ca. 25 % größer als die übrigen. Lässt man zunächst diese Tatsache außer Acht bzw. nimmt man diese Unsicherheit in der Bestimmung der Zeitkonstanten in Kauf, so kann man feststellen, dass der Anfangsdruck für das Resultat der Messung keine große Rolle spielte. Für genauere Angaben über die Auswirkung des Anfangsdrucks auf den Wert der Zeitkonstanten werden weitere Untersuchungen empfohlen.
- Der Unterschied zwischen der durch Kurvenanpassung ermittelten und der lediglich anhand von zwei Druckwerten berechneten Zeitkonstanten ist unwesentlich.
- Die Änderung des Anfangsdrucks hat den Wert der Zeitkonstanten nicht merklich verändert; folglich wurde die Superlage durch die Druckerhöhung auf 80 mbar nicht beschädigt.

|                |                |                |                |               |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|
| $p_0$ [mbar]   | 20             | 50             | 80             | 50            | 20             |
| $\tau_1$ [min] | 364 ± 21 (360) | 340 ± 19 (342) | 431 ± 28 (460) | 317 ± 8 (323) | 367 ± 31 (390) |

**Tabelle 4.3:** Die Zeitkonstanten der unter verschiedenen Anfangsdruckwerten auf Gasdichtigkeit getesteten Superlage SL 018. Die in den Klammern eingetragenen Werte beziehen sich auf die Zeitkonstanten, errechnet nur durch Angabe von Anfangs- und Enddruck (d.h. keine Kurvenanpassung). Die Messdaten wurden mit einem 8-bit-ADC aufgenommen.

## 4.5 Drucktests

Bereits im vorigen Abschnitt wurde darauf hingewiesen, dass eine Superlage bei einem zu hohen Überdruck beschädigt werden könnte. Den Berechnungen zufolge sollte eine Superlage bei makelloser Klebung einem Überdruck von mindestens 100 mbar standhalten [25].

Für die Verifizierung dieser theoretischen Überlegungen werden an den Superlagen Drucktests durchgeführt. Die Methode dieser Tests besteht darin, die Superlage bis zu einem Überdruck von etwa 100 mbar mit Gas zu füllen, sie dann abzusperrern, und eine Zeitlang (>10 min) zu beobachten, ob die Superlage keinen Schaden durch diesen Überdruck erleidet. Das würde sich in einem raschen Druckabfall manifestieren; man könnte es auch akustisch wie optisch durch Geräusche und Verformungen der Superlage wahrnehmen.

Im Prinzip handelt es sich bei diesen Tests um eine Form des Gasdichtigkeitstests, daher eignet sich das in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene Verfahren gut dafür, diese Tests durchzuführen. Praktisch geht man so vor, dass man den ersten Dichtigkeitstest mit einem Anfangsdruck von etwa 100 mbar ausführt, und nach den etwaigen Abweichungen vom Normalzustand (zu schneller Druckabfall etc.) Ausschau hält. Man kann diesen Test auch unabhängig von einer Dichtigkeitsmessung vornehmen.

Die Messdaten dieser Tests von allen Superlagen, die diesem Test unterzogen wurden, sind in der Tabelle 4.4 aufgeführt. Aus Sicherheitsgründen wurden im Gassystem zur Versorgung der getesteten Kammern Sicherheitsventile eingesetzt, so dass manche Drucktests abhängig von dem eingesetzten Ventilmodell nur mit etwa 80 mbar Überdruck durchgeführt werden konnten.

#### 4. GATESTS AN DEN MYONKAMMERN

|                         |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| SL Number               | <b>001</b> | <b>002</b> | <b>003</b> | <b>004</b> | <b>005</b> | <b>006</b> | <b>007</b> | <b>008</b> | <b>009</b> | <b>010</b> |
| $p$ [mbar] ( $t$ [min]) |            |            |            |            | 101 (12)   |            |            | 99 (10)    |            |            |
| SL Number               | <b>011</b> | <b>012</b> | <b>013</b> | <b>014</b> | <b>015</b> | <b>016</b> | <b>017</b> | <b>018</b> | <b>019</b> | <b>020</b> |
| $p$ [mbar] ( $t$ [min]) | 80 (60)    | 99 (10)    | 83 (20)    | 83 (30)    | 83 (50)    |            | 82 (10)    | 80 (20)    | 84 (30)    | 81 (10)    |
| SL Number               | <b>021</b> | <b>022</b> | <b>023</b> | <b>024</b> | <b>025</b> | <b>026</b> | <b>027</b> | <b>028</b> | <b>029</b> | <b>030</b> |
| $p$ [mbar] ( $t$ [min]) | 81 (40)    | 80 (10)    | 81 (10)    |            | 81 (10)    | 81 (60)    |            | 81 (10)    | 84 (30)    | 82 (60)    |
| SL Number               | <b>031</b> | <b>032</b> | <b>033</b> | <b>034</b> | <b>035</b> | <b>036</b> | <b>037</b> | <b>038</b> | <b>039</b> | <b>040</b> |
| $p$ [mbar] ( $t$ [min]) | 81 (20)    | 100 (70)   | 80 (10)    | 80 (10)    | 90 (110)   |            | 100 (40)   | 100 (30)   | 100 (50)   |            |

**Tabelle 4.4:** Die Ergebnisse der Drucktests an den Superlagen. Eingetragen wurden die Druckwerte, bei denen die Tests vorgenommen wurden, und in Klammern die Testdauern.

Alle getesteten Superlagen haben den Drucktest sehr gut überstanden; der Überdruck von 80 bis 100 mbar hat keine Auswirkung auf die Festigkeit der Myonkammern.

## Kapitel 5

# Die Impedanz der CMS-Myonkammern

### 5.1 Methode und erste Messungen

Strömt ein reales Fluid (Flüssigkeit oder Gas) durch ein Objekt, so beobachtet man ein durch die dynamische Viskosität bedingtes Druckgefälle zwischen dem Eingang und dem Ausgang des durchströmten Objekts (Abbildung 5.1).



**Abbildung 5.1:** Durch ein Objekt strömender Gasfluss  $\phi$  bewirkt zwischen den Enden des Objektes eine Druckdifferenz  $\Delta p$ . Ein Maß für einen solchen Strömungswiderstand ist die Impedanz  $\Delta p/\phi$ .

Dieser Druckabfall ist von der pro Zeiteinheit strömenden Gasmenge sowie von der inneren Beschaffenheit des Objekts abhängig. Als Maß für einen solchen Strömungswiderstand kann man die Impedanz  $R$  definieren<sup>1</sup>

$$R = \frac{\Delta p}{\phi} \quad [\text{mbar}/(\text{l/h})] \quad (5.1)$$

$\Delta p = p_1 - p_2$  – Druckdifferenz;  
 $\phi$  – Volumenstrom.

---

<sup>1</sup> Die Analogie zu dem weit vertrauteren Ohmschen Gesetz  $R_{el} = U/I$  ( $U$  – Spannung, *Potentialdifferenz*;  $I$  – *Ladungsstrom*) ist hier deutlich.

## 5. DIE IMPEDANZ DER MYONKAMMERN

Die theoretische Berechnung von  $R$  ist allgemein schwierig und nur für wenige einfache Objekte, wie z.B. gerade Rohrstücke, durchführbar (siehe weiter unten). Die Bestimmung der Impedanz wird daher generell durch Messung von  $\Delta p$  und  $\phi$  bewerkstelligt.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass eine der Bedingungen für die einwandfreie Arbeit des Myonsystems im CMS-Experiment in der Gewährleistung des konstanten Drucks in jeder der 250 Myonkammern besteht (Kapitel 3.1). Darüber hinaus sollte jede Superlage einer Kammer mit der gleichen Gasmenge versorgt werden. Betrachtet man die Abbildung 3.1, so sieht man, dass die Gasleitungen, bedingt durch die unterschiedliche Lage der Kammern, ungleich lang sind. Ferner weisen die Superlagen  $\phi$  und  $\theta$ , aus denen die Kammern bestehen, verschiedene Geometrien auf. Bei einem unkontrollierten Gasfluss würden also am Eingang jeder Kammer verschiedene Druckwerte gemessen werden. Unabhängig davon würden zur selben Zeit im Innern der Superlagen einer Myonkammer – falls die Superlagen  $\phi$  und  $\theta$  unterschiedliche Impedanzen haben – unterschiedliche Gasvolumina ausgetauscht werden.

Dem ersten Problem kann durch den Einbau von Ventilen, Flussreglern etc. in den Leitungen Abhilfe geschafft werden. Um die zweite Schwierigkeit zu beseitigen, müssen zuerst die Impedanzmessungen an den verschiedenartigen Superlagen vorgenommen werden, und dann, im Fall verschiedener Messergebnisse für jeden Superlagentyp, Vorkehrungen getroffen werden, um ihre Impedanzen auszugleichen.

Um diese Impedanzen zu bestimmen, wurden bei verschiedenen Superlagen vom Typ  $\phi$  und  $\theta$  die Druckdifferenzen  $\Delta p$  gemessen. Zuvor jedoch wurden – um die Qualität dieser Messmethode abzuschätzen – Impedanzmessungen von geraden Rohr- bzw. Schlauchstücken getätigt, deren theoretische Werte sich aus dem Gesetz von Hagen-Poiseuille für laminare Strömungen ergeben:

$$R = \frac{8\eta l}{\pi r^4} \quad (5.2)$$

$\eta$  – dynamische Viskosität des Mediums;  
 $l$  – Länge des Rohres;  
 $r$  – Innenradius des Rohres.

Für diese Art von Untersuchungen, bei der man eine Reihe von Messungen an geraden Rohrstücken mit verschiedenen Längen  $l$  vornimmt, erweist es sich als nützlich, die spezifische Impedanz

$$R' = \frac{R}{l} \quad [\text{mbar}/(\text{l}\cdot\text{m}/\text{h})]. \quad (5.3)$$

zu definieren.

Gemessen wurden dafür die Druckdifferenzen, die sich an von Gas durchflossenen geraden Schläuchen verschiedener Längen (einige m) mit den Innenradien  $r_1 = 2$  mm und  $r_2 = 3$  mm bei Flusswerten  $\phi$  von 87 bis 696 l/h in Schritten zu 87 l/h gebildet haben<sup>2</sup>. Die Druckmessung am Eingang und am Ausgang des Testobjekts wurde mit Hilfe des *PG4*-Manometers mit jeweils zwei Drucksensoren vom Typ *MPX2050DP* und *MPX2010DP* unter 8-bit-Auflösung aufgenommen. Die Flussmessung erfolgte mit Hilfe eines analogen Durchflussreglers der Firma *Krohne*. Anhand der Messergebnisse konnte man einen gemittelten Wert für die spezifische Impedanz der beiden Schlauchsarten ermitteln:

$$R'_{r_{1meas}} = 0,0077 \pm 0,0012 \text{ mbar}/(\text{l}\cdot\text{m}/\text{h})$$

$$R'_{r_{2meas}} = 0,0013 \pm 0,0003 \text{ mbar}/(\text{l}\cdot\text{m}/\text{h})$$

Die nach (5.2) und (5.3) berechneten theoretischen Werte sind entsprechend

---

<sup>2</sup> Diese etwas ungewöhnlich erscheinende Auswahl der Messparameter resultiert daraus, dass die Flussmessung mit den auf Luft geeichten analogen Flussmetern erfolgte, deren Skalen in Schritten von 100 l/h markiert sind. Um die Flussmenge des verwendeten Gases zu bestimmen, muss man den angezeigten Wert mit einem Faktor  $\eta_{\text{Luft}}/\eta_{\text{Gas}}$  multiplizieren. Für das verwendete Gas ist  $\eta_{\text{Luft}}/\eta_{\text{Gas}} \approx 0,87$ .

$$R'_{r_1, theor} = 0,0087 \text{ mbar/(l·m/h)}$$

$$R'_{r_2, theor} = 0,0017 \text{ mbar/(l·m/h)}$$

Das Verhältnis  $R_{meas}/R_{theor}$  ist ca. 0,8; dieses Verfahren eignet sich demnach gut zur Bestimmung der Impedanzen von Superlagen.

Nachdem die Methode überprüft war, wurde versucht, die Impedanz einer Superlage zu bestimmen. Untersucht wurde zunächst bei der Anwendung des gleichen, oben beschriebenen Verfahrens und der selben Messgenauigkeit die mechanisch fertige, komplett bestückte und mit den in Aachen gewöhnlich benutzten *Swagelok*-Gasanschlüssen ausgestattete Superlage SL 018 vom Typ  $\phi^3$ . Hier zeigte es sich, dass man sinnvolle Druckwerte erst ab einem Gasfluss von etwa 600 l/h bekommen kann. Da der gemessene Wert der Impedanz der Superlage sehr niedrig ist, erreicht man die Grenze der Messgenauigkeit des 8-bit-ADC. Der bei diesem Flusswert ermittelte Wert der Impedanz beträgt  $R_{\phi, 8bit} = 0,0082 \pm 0,0014 \text{ mbar/(l/h)}$ .

## 5.2 Messungen mit höherer Auflösung

Um die Messgenauigkeit zu erhöhen und dadurch die Impedanzwerte im ganzen Flussmessbereich zu bestimmen, wurden die nachfolgenden Messungen mit Hilfe eines höher auflösenden ADC vorgenommen. Für diese Untersuchungen wurden fünf Superlagen vom Typ  $\phi$  und drei Superlagen vom Typ  $\theta$  benutzt. Um den etwaigen Einfluss der an beiden Seiten verschiedenartigen Gasanschlüsse auf die Messergebnisse zu untersuchen, wurden bei einer  $\theta$ -Superlage (SL 044) der Gaseingang mit dem -ausgang vertauscht, und die Messung wurde wiederholt. Um den Einfluss der Impedanz der verwendeten Gasanschlüsse (4 mm Innendurchmesser) auf die Messergebnisse zu untersuchen, wurden diese Anschlüsse ohne Superlage zu einem Stück kurzgeschlossen und dessen Impedanz gemessen. Ebenfalls wurde die Impedanz der für CMS vorgesehenen Gasanschlüsse (3 mm Innendurchmesser) bestimmt<sup>4</sup>.

Bei den üblichen Einstellungen des Gasflusses von 87, 179, 231... l/h wurden in Zeitintervallen von 0,1 s jeweils 1000  $\Delta p$ -Werte mit Hilfe des speziell dafür präparierten *PG4*-Manometers und des 16-bit-ADC direkt aufgenommen. Gemessen wurde jeweils mit einem Drucksensor vom Typ *MPX2050DP* und *MPX2010DP*. Anhand der aufgezeichneten Druckwerte wurde dann der Mittelwert gebildet und die dazugehörige Standardabweichung der Messwerte errechnet. Schließlich wurden für jede gemessene Superlage (mit Gasanschlüssen) und jeden Gasanschlusstyp die Ergebnisse in Form eines Diagramms aufgetragen und anhand dieser Messergebnisse eine Kurvenanpassung vorgenommen (Abbildung 5.2 und 5.3).

Aus den Messergebnissen lassen sich vorerst folgende Schlussfolgerungen für die Superlagen der MB1-Myonkammern formulieren:

- Die Resultate der Messungen, die an verschiedenen, mit Gasanschlüssen versehenen Superlagen desselben Typs vorgenommen wurden, wichen kaum voneinander ab. Bei Flüssen oberhalb etwa 300 l/h wurden die Druckdifferenzen der  $\phi$ -Superlagen im Mittel etwa um 10 % größer gemessen als diejenigen der  $\theta$ -Superlagen.
- Die gemessenen Standardabweichungen jedes Messwerts (1000 Messpunkte pro Einstellung) liegen im Mittel um einen Faktor 10 bei Sensor *MPX2010D* und um einen Faktor 5 bei Sensor *MPX2050D* (gemessen:  $\sigma_{100} = 0,025 \text{ mbar}$ ,  $\sigma_{500} = 0,070 \text{ mbar}$ ) höher als der theoretische, sich

<sup>3</sup> Wenn nicht anders vermerkt, beziehen sich im Folgenden die Aussagen über Impedanzen der Superlagen stets auf fertige, komplett bestückte Superlagen *ohne* Gasanschlüsse. Sie werden aus der Differenz der Impedanzen der Superlagen mit den angebrachten Gasanschlüssen und der Impedanz der Gasanschlüsse allein berechnet.

<sup>4</sup> Die in Aachen für den Laborbetrieb verwendeten *Swagelok*-Gasanschlüsse, unterscheiden sich in Form, Beschaffenheit und vor allem in der Größe des Innendurchmessers von den für den CMS-Betrieb vorgesehenen *Sagana*-Anschlüssen, so dass ein Unterschied in der gemessenen Impedanz zu erwarten ist.

## 5. DIE IMPEDANZ DER MYONKAMMERN

aus der ADC-Auflösung ergebende Wert (16-bit:  $\sigma_{100} = 0,003$  mbar,  $\sigma_{500} = 0,014$  mbar). Die Schwankungen der Messpunkte sind also auf andere Ursachen als ADC-Fehler (z.B. Elektronik, Sensorträgheit etc.) zurückzuführen. Bei größeren Flüssen ab etwa 500 l/h könnten die sichtbaren Druckschwankungen (turbulente Strömung, Schwankungen an Flussraten) zur breiteren Streuung der Messpunkte beitragen.

- Der zuvor mit 8-bit-ADC bei  $\phi = 600$  l/h ermittelte Impedanzwert der  $\phi$ -Superlage mit angebrachten Gasanschlüssen  $R_{\phi 8\text{bit}} = 0,0082 \pm 0,0014$  mbar/(l/h) stimmt mit dem unter 16-bit-Auflösung bei etwa 700 l/h gemessenen Wert  $R_{\phi 16\text{bit}} = 0,0087 \pm 0,001$  mbar/(l/h) gut überein.
- Die Vertauschung der Gasanschlüsse miteinander am Eingang und Ausgang der Superlage SL 044 zeigte keine Auswirkung auf die Messergebnisse.
- Die Abhängigkeit der gemessenen Druckdifferenzen von dem Gasfluss ist nicht linear. Mittels der Messwerte wurde eine Kurvenanpassung vorgenommen, deren Form

$$\Delta p = a\phi^2 + b\phi, \quad a, b = \text{const} \quad (5.4)$$

lautet. Nach [20] gilt  $\Delta p \sim \phi^2$  für turbulente und  $\Delta p \sim \phi$  für laminare Strömung<sup>5</sup>, so dass die Terme  $a\phi^2$  und  $b\phi$  die Anteile der jeweiligen Strömungsart beschreiben. Für die Superlagen mit Gasanschlüssen ergaben sich die mittleren angepassten Werte  $a = 1 \cdot 10^{-5}$  mbar/(l/h)<sup>2</sup> und  $b = 1 \cdot 10^{-3}$  mbar/(l/h) für den  $\phi$ -Typ sowie  $a = 8 \cdot 10^{-6}$  mbar/(l/h)<sup>2</sup> und  $b = 1 \cdot 10^{-3}$  mbar/(l/h) für den  $\theta$ -Typ. Sucht man nach einem Flusswert  $\phi_{\text{krit}}$ , ab welchem einer der beiden Terme überwiegt, so findet man den Bereich, bei dem der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung stattfindet. Dieser Wert beträgt  $\phi_{\text{krit}} = 100$  l/h für die  $\phi$ -Superlagen und  $\phi_{\text{krit}} = 125$  l/h für die  $\theta$ -Superlagen.

### 5.3 Folgerungen für den Betrieb der Kammern

Für den CMS-Detektor sind Impedanzen der Superlagen bei Gasflüssen unterhalb 100 l/h pro Superlage relevant. Bei normalem Betrieb wird der Gasfluss innerhalb einer Superlage bis ca. 20 l/h betragen, beim Spülen mit Gas können Flüsse von 50 l/h eingestellt werden. Die Impedanzen für die jeweiligen Superlagentypen  $R_{\phi}$  und  $R_{\theta}$ , berechnet nach Gleichung (5.1) und (5.4) beim Einsetzen der entsprechenden Konstanten  $a$  und  $b$ , sowie für die gesamte Kammer  $1/R_{\text{Kammer}} = 2/R_{\phi} + 1/R_{\theta}$ , sind für einige Werte  $\phi$  aus diesem Bereich in Tabelle 5.1 aufgelistet.

Aus den Messungen der Impedanzen ergeben sich folgende Konsequenzen:

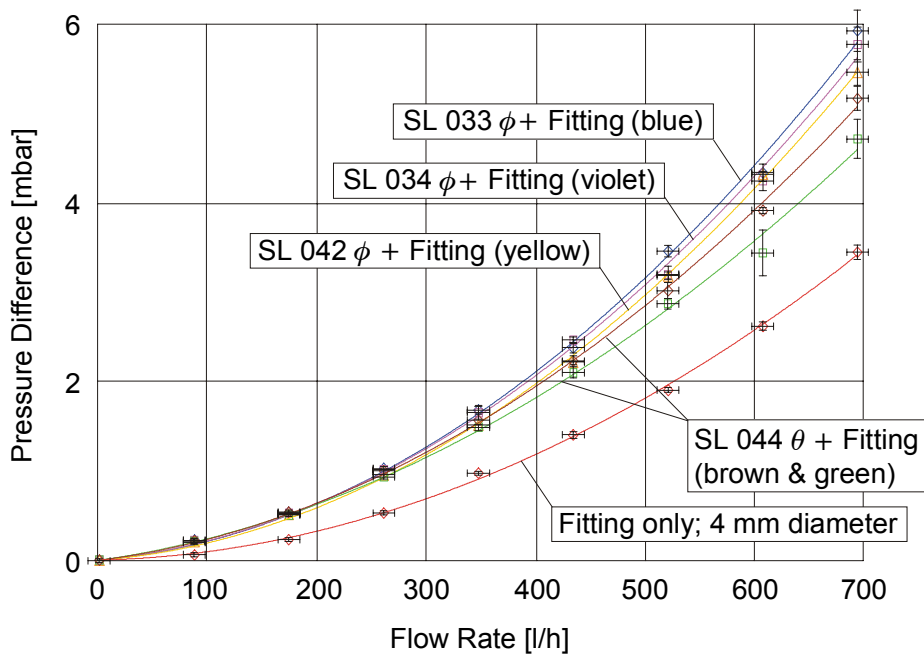
- Die Impedanz der Kammer bei dem vorgesehenen nominalen Gasfluss  $\phi = 50$  l/h beträgt  $4,9 \cdot 10^{-4}$  mbar/(l/h). Die minimale Impedanz der Gasleitungen bei CMS beträgt bei diesem Fluss  $18 \cdot 10^{-4}$  mbar/(l/h). Damit alle Kammern innerhalb einer Zeit die gleiche Menge Gas bekommen, muss der Gasfluss in den einzelnen Leitungen des Myonsystems einstellbar sein.
- Der größte Druckabfall findet an den an eine Superlage angebrachten Gasanschlüssen. Die Impedanz dieser Anschlüsse liegt um einen Faktor 7 höher als die Impedanz der Superlagen ohne die Gasanschlüsse (Abbildung 5.3). Eine Superlage übt demnach so gut wie keinen Einfluss auf den Druckabfall im Gassystem des CMS-Detektors aus.

<sup>5</sup> Diese Beziehungen gelten in erster Linie für Rohre bzw. Objekte mit kreisförmiger Öffnung. Es ist speziell bei der turbulenten Strömung

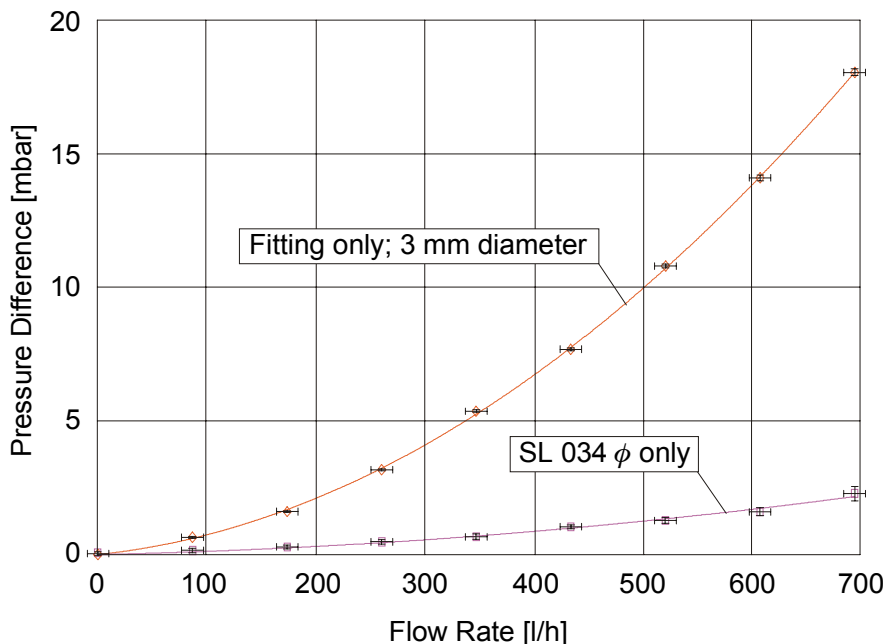
$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{256l\rho}{r^5\pi^2} \cdot \phi^2 \quad (5.5)$$

$\lambda$  – Rohrreibungszahl.

Bei der laminaren Strömung gilt die Hagen-Poiseuille-Gleichung (5.1) und (5.2).



**Abbildung 5.2:** Die Auftragung der Druckdifferenzen  $\Delta p$  in Abhängigkeit vom Gasstrom  $\phi$  bei verschiedenen Typen von Superlagen mit angebrachten Gasanschlüssen und bei einem kurzgeschlossenen Gasanschluss, dessen Innendurchmesser 4 mm betrug. Jeder Messwert stellt einen Mittelwert aus den 1000 Einzelmesspunkten dar; die Standardabweichung dieser Messpunkte ist in Form der vertikalen und die Ablesefehler des Flusses als horizontale Fehlerbalken gezeigt. Der Zusammenhang ist nicht linear, und um die Impedanz im interessanten Messbereich unterhalb von 100 l/h zu bestimmen, muss eine Kurve angepasst werden. Die hier abgebildeten, von einem *MPX2010D*-Sensor gemessenen Messwerte wurden mit Hilfe eines 16-bit-ADC ausgelesen.



**Abbildung 5.3:** Die Druckdifferenzen  $\Delta p$  in Abhängigkeit vom Gasstrom  $\phi$  bei einem kurzgeschlossenen, für den CMS-Betrieb vorgesehenen Gasanschluss (Innendurchmesser 3 mm) und einer Superlage (hier repräsentativ SL 034). Der Impedanzwert des Gasanschlusses liegt um einen Faktor 7 höher als derjenige der Superlage allein. Die Impedanz einer Superlage im Myonsystem ist demnach zu vernachlässigen. Gemessen wurde mit einem *MPX2010D*-Sensor und 16-bit-ADC.

## 5. DIE IMPEDANZ DER MYONKAMMERN

| $\phi$ [l/h]                     | 20                   | 50                  | 100                 |
|----------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| $R_\phi$ [mbar/(l/h)]            | $1,2 \cdot 10^{-3}$  | $1,5 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-3}$   |
| $R_\theta$ [mbar/(l/h)]          | $1,16 \cdot 10^{-3}$ | $1,4 \cdot 10^{-3}$ | $1,8 \cdot 10^{-3}$ |
| $R_{\text{Kammer}}$ [mbar/(l/h)] | $4 \cdot 10^{-4}$    | $4,9 \cdot 10^{-4}$ | $6,4 \cdot 10^{-4}$ |

**Tabelle 5.1:** Die Impedanzen der einzelnen Superlagen und der gesamten MB1-Myonkammer bei verschiedenen Gasflüssen.

- Die Unterschiede in den Impedanzen der Superlagen innerhalb einer MB1-Kammer sind klein genug ( $R_\phi/R_\theta = 1,08$  bei  $\phi = 100$  l/h), so dass keine weiteren Vorkehrungen für den Impedanzausgleich zwischen den drei Superlagen in der Kammer nötig sind.
- Um das Gas innerhalb einer Superlage gleichmäßig zu verteilen, werden an der Innenseite jedes Deckels die sogenannten „Gasduschen“ angebracht. Es handelt sich dabei um ein längs des Deckels montiertes Rohr, an dessen dem Innern der Superlage zugewandten Seite in regelmäßigen Abständen kleine rundförmige Öffnungen von ca. 1 mm Durchmesser gebohrt sind. Beachtet man, dass in einer MB1-Superlage die Anzahl dieser Öffnungen am FE- bzw. HV-Deckel 32 ( $\phi$ -Typ) und 37 ( $\theta$ -Typ) bzw. 28 ( $\phi$ -Typ) und 34 ( $\theta$ -Typ) ist, sowie, dass diese Öffnungen maßgebend für die Impedanz der Superlage sind, so ergibt sich ein erwartetes Impedanzverhältnis von Superlagen beider Typen

$$(R_\phi/R_\theta)_{\text{theor}} = 1,19,$$

was mit dem gemessenen Wert  $(R_\phi/R_\theta)_{\text{meas}} = 1,08$  in etwa übereinstimmt<sup>6</sup>.

- Einige der  $\phi$ -Superlagen werden im CMS-Detektor in senkrechter Stellung so positioniert, dass die Deckel mit den Duschen vertikal zu Boden ausgerichtet werden (Abbildung 5.4). Es wird sich also in dem etwa 2 m langen Duschrohr (MB1-Kammer) ein durch Höhenunterschied verursachter barometrischer Druckabfall  $\Delta p_{\text{bar}}$  ausbilden, der etwa 0,3 mbar beträgt<sup>7</sup>. Um einen gleichmäßigen Fluss im Innern der Superlage zu gewährleisten, muss die Druckdifferenz  $\Delta p_{\text{imp}}$ , die sich aus der Impedanz der Superlage ergibt, größer als  $\Delta p_{\text{bar}}$  sein. Bei einem Gasfluss unterhalb 100 l/h wird  $\Delta p_{\text{imp}}$  höchstens 0,2 mbar betragen; es wird also stets gelten

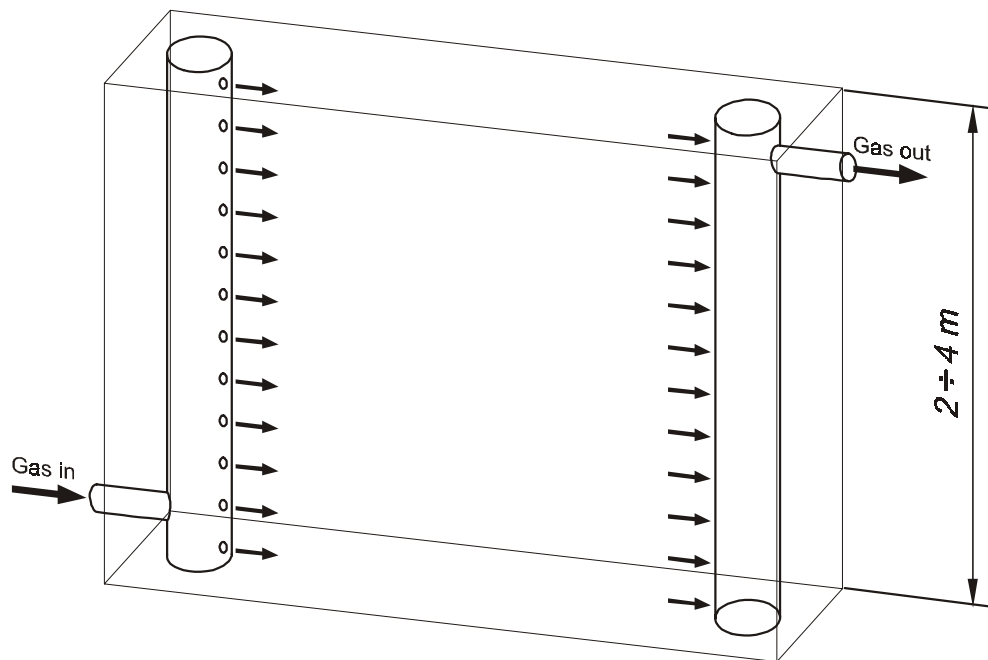
$$\Delta p_{\text{imp}} < \Delta p_{\text{bar}}$$

Die Füllung der Superlage mit Gas wird demnach durch statische Eigenschaften erfolgen, d.h. bei dem sich unten befindlichen Gaseingang wird das Gas nur durch ein paar Duschöffnungen, die sich in unmittelbarer Nähe des Gaseingangs befinden, in das Innere der Superlage hineinströmen. Dort wird das Ar/CO<sub>2</sub>-Gas die Luft – da es schwerer ist – langsam von unten nach oben aus der Superlage verdrängen.

<sup>6</sup> Die theoretischen, nach Hagen-Poiseuille errechneten Werte für die Impedanz der Superlagen sind  $R_{\phi \text{ theor}} = 1,59 \cdot 10^{-4}$  mbar/(l/h) und  $R_{\theta \text{ theor}} = 1,33 \cdot 10^{-4}$  mbar/(l/h) und sind um einen Faktor ca. 10 kleiner als die gemessenen Impedanzen. Einen solchen Wert bekommt man bereits, wenn das Durchmesser der Öffnungen nur wenige Zehntel mm größer ist als 1 mm (wegen  $R \sim 1/r^4$ , siehe Gleichung (5.2)). Auch durch die mechanische Fertigung (Bohrungen im Kunststoff) können bei diesen Abmessungen Verformungen zustande kommen, die die Gasführung beeinflussen können.

<sup>7</sup> Es kann bis etwa 0,6 mbar bei den MB4-Kammern betragen (ca. 4 m lange Deckel).





**Abbildung 5.4:** Schematische Darstellung der Gasverteilung innerhalb einer Superlage. Wird eine Superlage in die abgebildete Position gebracht, kann sich bei kleinen Gasflüssen eine kleinere dynamische Druckdifferenz als der barometrische Druckabfall in der senkrecht gestellten „Gasdusche“ ausbilden; ein gleichförmiger, auf die gesamte Superlage verteilter Gasfluss wird dann nicht mehr gewährleistet. In diesem quasistatischen Grenzfall ist es zur effizienten Beseitigung von Luft aus der Superlage besonders wichtig, den Gaseinlass (-auslass) am tiefsten (höchsten) Punkt zu haben (da  $\rho_{Ar/CO_2} > \rho_{Luft}$  ist).



## Kapitel 6

### Die Reinheit des Gases

Bereits in den vorangegangenen Kapiteln wurde auf die Einhaltung der richtigen Zusammensetzung des Gases hingewiesen. Vor allem der Zusammenhang zwischen einer gasdichten Myonkammer und dem Reinheitsgrad des Gases ist deutlich: Auch bei Überdruck in der Kammer kann durch Lecks bei der Gasströmung durch den Bernoulli-Effekt Luft aus der Umgebung in das Kammerinnere angesaugt werden<sup>1</sup>. Die Verunreinigung des Gases durch Luftbeimischung kann sich dann negativ auf die Arbeit der Kammern auswirken. So können Atome der elektronegativen Gase, wie z.B. Sauerstoff oder Wasserdampf, einen Teil der in der Lawinenzone befindlichen Elektronen an sich binden; dieser Effekt würde die Pulshöhe des Signals verringern. Die Stickstoffanteile bewirken eine Veränderung der Driftgeschwindigkeit (Abbildung 6.1).

Besonders wichtig ist die erste Gasspülung einer fertigen Superlage, da hier eine Luftmenge von etwa 200 l (MB1-Kammern) mit der gleichen Menge des Ar/CO<sub>2</sub>-Gasgemisches schnell auszutauschen ist. Ebenfalls nach jeder Öffnung der bereits mit Gas gefüllten Superlage (Reparatur, Kontrolle, etc.) muss lange genug mit Gas gespült werden, um die Superlagen luftfrei zu bekommen.

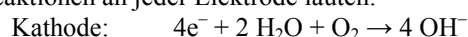
Ferner enthält das Aluminium der Kammer O<sub>2</sub>, das in der mit Gas gefüllten Kammer langsam abgegeben wird; dies hört bei längerem Betrieb auf. Auch die übrigen Kunststoffteile der Kammer gasen aus.

Die quantitative Bestimmung des Luftgehalts und somit der Sauerstoff- und Stickstoffanteile im Innern einer Superlage bzw. Kammer geschieht durch Messung der Sauerstoffkonzentration. Für diesen Zweck wurde ein Sauerstoffspurenanalysator *Teledyne 317 EXI* eingesetzt (Abbildung 6.2.), der aus zwei getrennten Komponenten besteht. Die erste, genannt Analyseneinheit, beherbergt die Messzelle *Micro-Fuel A2C*. Es handelt sich dabei um eine Brennstoffzelle, an deren Kathode beim Sauerstoffkontakt direkt eine Oxidation stattfindet. Die dabei freigesetzten OH<sup>-</sup>-Ionen wandern zur Anode und gehen dann mit dem Anodenmaterial (Blei) weitere Reaktionen ein. Der bei diesen Reaktionen stattfindende Austausch der Elektronen ist der O<sub>2</sub>-Menge proportional (jeweils 4 Elektronen pro ein O<sub>2</sub>-Molekül)<sup>2</sup> [26]. Über Messung dieses Stroms werden Aufschlüsse über die O<sub>2</sub>-Konzentrationen gewonnen.

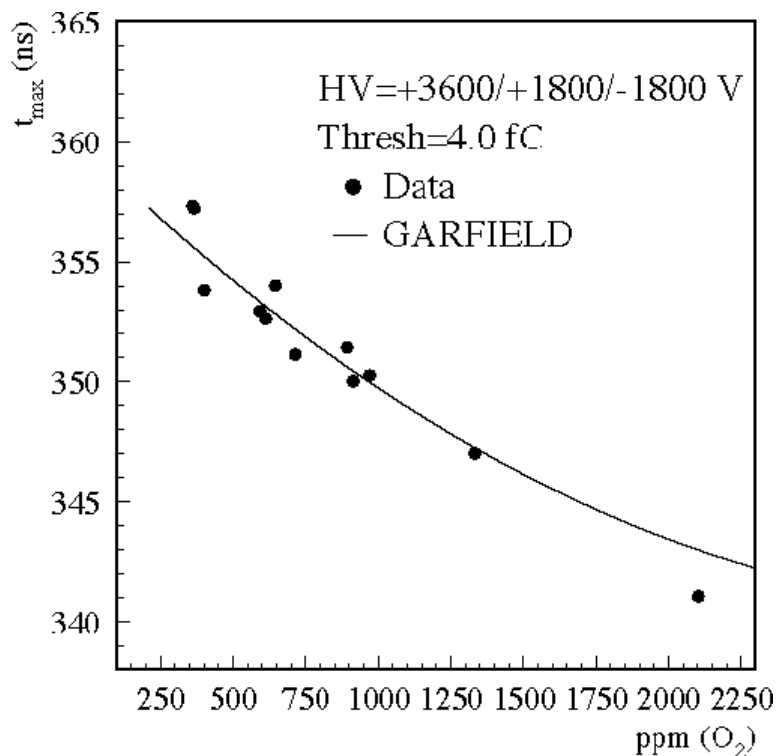
---

<sup>1</sup> Bei einigen Kollaboranten wurde anfangs die Möglichkeit erwogen, überhaupt keine Gasdichtigkeitstests, sondern nur Sauerstoffgehaltsmessungen durchzuführen, und lediglich anhand deren Ergebnisse indirekt Informationen über die Gasdichtigkeit der Kammern zu erhalten.

<sup>2</sup> Die vollständigen chemischen Reaktionen an jeder Elektrode lauten:



## 6. DIE REINHEIT DES GASES



**Abbildung 6.1:** Die Verringerung der maximalen Driftzeit mit der zunehmenden Stickstoffkonzentration (hier als Funktion der O<sub>2</sub>-Konzentration, die der N<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft proportional ist, dargestellt) anhand der gemessenen (Punkte) und simulierten (Linie) Daten [9].

Die zweite Komponente ist die Kontrolleinheit, die die Elektronik des Analysesystems und die Steuerungselemente beinhaltet.

Dieses Messgerät wird dann in Reihe an die ausgehende Gasleitung einer Superlage angeschlossen. Es ist nicht notwendig und auch nicht ratsam, während des ganzen Spülvorgangs das Gerät im eingeschalteten Zustand zu lassen und die Anzeige laufend abzulesen, zumal die Lebensdauer der Messzelle beim permanenten Sauerstoffkontakt nur wenige Monate beträgt. Praktisch geht man so vor, dass man die zuvor abgesperrte Messzelle dem Gas aussetzt (während der eigentlichen Spülzeit der Kammer wird das Gas über ein parallel im Gerät eingebautes Bypass-System geleitet), das Gerät einschaltet, und die Anzeige abliest. Es gibt auch die Möglichkeit, die Daten elektronisch auszulesen.

Der Messbereich von *Teledyne 317 EXI* beträgt 0 bis 10000 ppm. Die Sauerstoffkonzentration in den in Betrieb genommenen Myonkammern soll nicht höher als 550 ppm betragen [22].

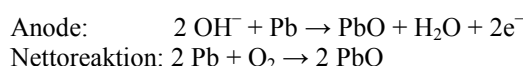
Für die Kennzeichnung, wie lange man zu spülen braucht, um eine bzw. mehrere an eine Gasleitung angeschlossene Superlage auf einen bestimmten Sauerstoffgehaltswert zu bringen, ist der Begriff der Volumenaustauschzahl  $n_V$  nützlich:

$$n_V = \frac{\phi \cdot t}{V_{obj}} \quad (6.1)$$

$\phi$  – Gasfluss;

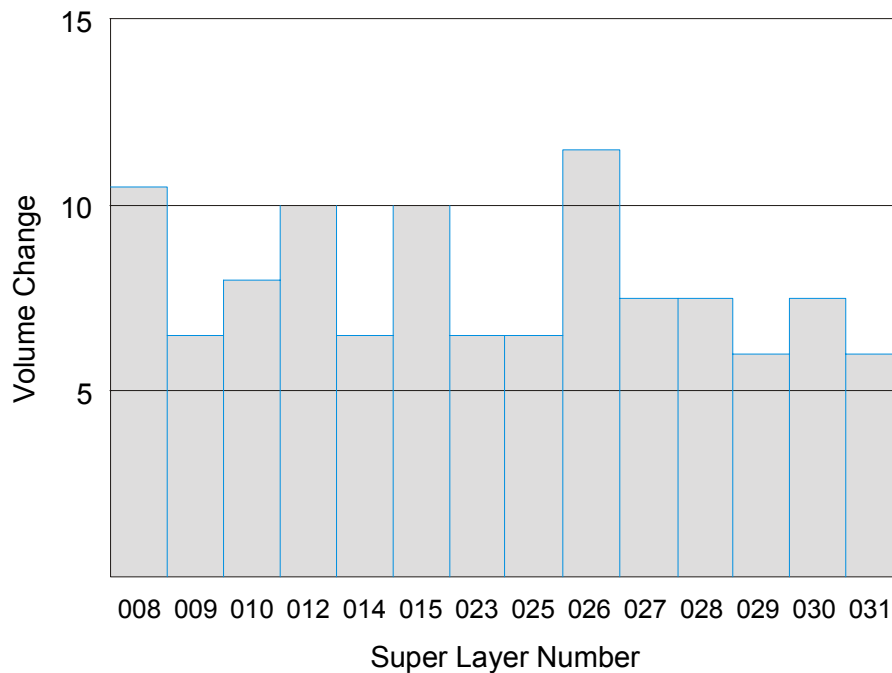
$t$  – Spüldauer;

$V_{obj}$  – Volumen des gespülten Objekts.





**Abbildung 6.2:** Mit Hilfe eines Sauerstoffspurenanalysators wird am Auslass einer Superlage eine Sauerstoffgehaltsmessung vorgenommen [11]. Während des Spülens der Kammer wird das Gas um das Messgerät geleitet, um die Sonde zu schonen. Die Myonkammern liefern nur dann korrekte Ergebnisse, wenn die  $O_2$ -Konzentration den Wert 550 ppm nicht überschreitet.



**Abbildung 6.3:** Volumenaustauschzahl  $n_V$  einiger waagrecht liegenden Superlagen beim Erreichen des vorgegebenen Werts der  $O_2$ -Konzentration von 550 ppm. Um diesen Wert zu erreichen, wird daher empfohlen, bei jeder Superlage mindestens  $n_V = 10$  einzuhalten.

## 6. DIE REINHEIT DES GASES

In der Abbildung 6.3 werden Volumenaustauschwerte einiger Superlagen bei dem Erreichen der gewünschten Sauerstoffkonzentration von 550 ppm präsentiert. Die Superlagen lagen waagrecht und der Gasfluss betrug ca. 100 bis 200 l/h.

Anhand der Messergebnisse wird empfohlen, die Volumenaustauschzahl bei mindestens etwa  $n_V = 10$  zu halten. Es ist zu betonen, dass der vorgegebene Wert lediglich als Richtlinie zu deuten ist. Vielmehr sollte darauf geachtet werden, die Myonkammern so gut wie möglich von der Luft zu befreien. So werden die mit Myonen aus der kosmischen Strahlung getesteten Superlagen, die sich häufig über eine Woche und mehr im Teststand befinden, permanent mit Gas gespült. Es werden dabei die Werte des Sauerstoffgehalts unterhalb von 50 ppm registriert (24 ppm für SL 008 bei  $n_V = 40$ ).

Beim Betrieb des CMS-Detektors wird das Gas größtenteils (jeweils  $\leq 10$  % Frischgas) rezirkuliert und dabei gereinigt, wobei hauptsächlich  $O_2$  entfernt wird. Dadurch wird das  $O_2/N_2$ -Verhältnis verändert. Daher wird am Experiment die Sauerstoffkonzentration wie oben gemessen. Die von der Stickstoffkonzentration abhängige Driftgeschwindigkeit wird mit einer dedizierten Driftzelle direkt gemessen.

## Kapitel 7

### Zusammenfassung

Im III. Physikalischen Institut A der RWTH Aachen wird ein Viertel der Driftkammern für das Myonensystem des zukünftigen CMS-Detektors am LHC hergestellt. Diese Myonkammern werden während des Experiments und in der Testphase permanent mit einem Ar/CO<sub>2</sub>-Gemisch (im Verhältnis 85% zu 15%) unter einem niedrigen Überdruck betrieben. In dieser Arbeit wurden zunächst die Methode, Durchführung und Qualität der Kalibration der für den Betrieb der Kammern notwendigen Drucksensoren (ca. 1100 Stück) beschrieben. Weiterhin befasst sich diese Arbeit mit der Schaffung eines Umfelds, das die Durchführung von Gastests an den Kammern ermöglicht. Diese Aufgabe wird durch Realisierung dieser Tests und Analyse der Resultate vervollständigt.

Für die Überwachung des Gasdrucks am CMS sowie für die Tests in Produktionszentren wurden entsprechende Drucksensoren ausgesucht und kalibriert. Um die Kalibration mehrerer Sensoren gleichzeitig vorzunehmen, wurde ein Programm entwickelt, das die Messdaten des Referenzmanometers und der zu kalibrierenden Drucksensoren automatisch registriert sowie die Kalibration protokolliert. Die mit der 12-bit-Auflösung aufgenommene Kalibrationskurve zeigte einen deutlichen Vorteil der Verwendung eines höher als 8 bit auflösenden ADC. Die unter verschiedenen Versorgungsspannungen durchgeführten Kalibrationen zeigten, dass die für den CMS-Betrieb erforderliche Sensorspannung nicht notwendig stabilisiert werden muss, wenn sie gleichzeitig mitgemessen wird. Der Vergleich der Kalibrationskurven der bestrahlten Sensoren mit denjenigen im nicht bestrahlten Zustand zeigt, dass die Teilchenstrahlung am CMS keine Auswirkung auf die Arbeit der Sensoren ausüben wird. Anhand der Kalibrationen der Drucksensoren im äußeren Magnetfeld konnte man feststellen, dass die Funktionalität der Sensoren nur dann unbeeinträchtigt bleibt, wenn sie mit den Sensorflächen parallel zu den Magnetfeldlinien positioniert werden.

Besonders wichtig ist für die Myonkammern, dass sie im gasdichten Zustand betrieben werden können. Für diesen Zweck werden an fertigen Superlagen bzw. Kammern die Gasdichtigkeitstests vorgenommen. Um diese Tests automatisch durchzuführen wurde ein Programm entwickelt, das den zeitlichen Druckabfall an einer mit Gas gefüllten Kammer misst und anhand der gemessenen Daten den Wert der Zeitkonstanten berechnet. Dieser zunächst auf Grund der theoretischen Überlegungen eingeführte Begriff wird als Maß für die Dichtigkeit der Kammern verwendet. Seine Validität wurde durch die Analyse der Messdaten bestätigt. Darüber hinaus wurden Drucktests vorgenommen, anhand deren Ergebnisse Aussagen über die Druckfestigkeit der Myonkammern getroffen werden konnten.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Für die Gasverteilung im Gassystem des CMS-Detektors ist der Druckabfall bei gasdurchflossenen Kammern von Bedeutung. Die Messungen der Impedanzen (d.h. des Quotienten aus Druckdifferenz und Gasfluss) ergaben, dass der größte Druckabfall in den Gasleitungen und in den an den Kammern angebrachten Gasanschlüssen stattfindet. Dies hat besondere Folgen für die senkrecht gestellten Kammern im CMS-Detektor und für die Lage der Gasanschlüsse an den Kammern.

Schließlich wurde, um die Qualität des verwendeten Gases zu überprüfen, der Sauerstoffgehalt gemessen. Den vorgeschriebenen Sauerstoffgehaltswert von  $\leq 550$  ppm erreicht man, wenn man die zuvor unter Luft befindliche Kammer mit einer Gasmenge, die zehn mal so groß ist wie das Kammervolumen, spült.



## Anhang

### A. Die Software „Gas Calibration v1.1“

Zum Starten des Programms muss man in der Benutzeroberfläche (*Virtual Instrument, VI*) den weißen Pfeil (*run button*) im Tool-Balken links oben mit der Maus anklicken. Der Pfeil wird nun schwarz und das *stop button* (3. von links im Tool-Balken) rot, um zu signalisieren, dass das Programm sich im Run-Modus befindet. Die Ausführung der Software kann zu jeder Zeit dauerhaft oder temporär unterbrochen werden. Zu diesem Zweck klickt man entweder den Pause-Knopf (*break button*) mit den zwei vertikalen schwarzen Balken an, um den Messvorgang zu unterbrechen, oder das rote Stopp-Symbol (*abort button*), um die Ausführung zu beenden, an.

Für die Messung werden vom Benutzer ein paar Informationen benötigt, die durch Eintippen bzw. Anklicken an bestimmten Stellen der *VI* eingegeben werden können. Dazu zählen:

– Für das zu kalibrierende PG4-Manometer (unterhalb der Markierung **Unit to be Calibrated**):

- **Set Port Number**: Nummer (von 1 bis 10) der seriellen Schnittstelle am PC, an welche das zu kalibrierende Manometer angeschlossen ist.
- **Supply Voltage**: Spannungswert (in Volt), mit dem die Sensoren des Manometers versorgt sind.
- **Type & Number of Unit to be Calibrated**: Bezeichnung für das zu kalibrierende Manometer

– Für das Referenzdruckmanometer:

- **Set Port Number**: wie im Fall des zu kalibrierenden Manometers soll hier die Nummer der Schnittstelle gewählt werden. Sollte versehentlich die selbe Nummer wie bei dem zu kalibrierenden Messgerät gewählt werden, erscheint ein Dialogfenster mit der Aufforderung, die Nummer der Schnittstelle zu ändern.

– Für den zeitlichen Ablauf der Kalibration:

- **Measure every ... s**: Zeitintervall (in Sekunden), das zwischen zwei Punkten liegt, an welchen die Messdaten abgelesen werden sollten.

– Für die äußeren Parameter (bei Beginn der Kalibration):

- **Atmospheric Pressure**: Umgebungsdruck (in mbar).
- **Air Temperature**: Umgebungstemperatur (in °C).
- **Air Humidity**: relative Luftfeuchtigkeit (in %).

## ANHANG

Um den Kalibrationsvorgang zu initiieren, klickt man den Knopf **Start/Stop** an. Der Pfeil an diesem Knopf ändert seine Farbe von rot (keine Messung) auf grün (Messung gestartet). Nach kurzer Zeit sollten folgende Anzeigen, die – falls sich deren Inhalte während der Kalibration ändern – immer in den gewählten Zeitabständen aktualisiert werden, in den entsprechenden Indikator-Fenstern sichtbar sein:

- **Device Type/Ser. No.:** Bezeichnung des Referenzmanometers.
- **Sensor 1 Type (Group A), Sensor 2 Type (Group A), Sensor 3 Type (Group B), Sensor 4 Type (Group B):** Typ des Sensors 1 bis 4 des Referenzmanometers; wird durch Angabe des Messbereichs und der Art der Druckmessung (relativ oder absolut) angegeben.
- **Number of Points Measured:** zeigt die Anzahl der Messpunkte, an denen die Messdatenaufnahme bereits erfolgte.
- **Current Date/Time:** zeigt Datum und aktuelle Uhrzeit an.
- **Beginning of Measurement:** zeigt Datum und Uhrzeit zu Beginn der Kalibration an.
- **Elapsed Time:** zeigt die verstrichene Zeit von Beginn der Kalibration an (in Stunden, Minuten und Sekunden).
- **Time since Last Point:** zeigt die seit dem letzten Messpunkt verstrichene Zeit (in Sekunden) an.
- **Time to Next Point:** zeigt die bis zum nächsten Messpunkt verbleibende Zeit an.
- **Pressure Sensor 1 (A), Pressure Sensor 2 (A), Pressure Sensor 3 (B), Pressure Sensor 4 (B):** zeigt den Druckwert (in mbar) jedes Referenzsensors an.
- **Pressure Max (A), Pressure Min (A), Pressure Max (B), Pressure Min (B):** zeigt den maximalen bzw. minimalen Druckwert (in mbar), der während der Kalibration gemessen wurde, an.
- **Sensor 1, Sensor 2, Sensor 3, Sensor 4:** zeigt das momentane Ausgangssignal (in digits) der vier zu kalibrierenden Sensoren an.
- **Write to File:** zeigt den Pfad an, in den die Datei mit den Messdaten geschrieben wird. Der Name der Datei und der Pfad werden automatisch generiert (siehe unten).
- Rechts am Bildschirm zeigen vier Diagramme den zeitlichen Verlauf der Kalibration. Es werden für jeden Referenzsensor Druckwerte in Abhängigkeit von der Zeit laufend dargestellt. Die Abszissen werden automatisch an die verstrichene Messzeit angepasst. Die Ordinaten, die die Druckwerte angeben, werden ebenfalls automatisch an die Daten angeglichen.

Um die Kalibration zu beenden, klickt man wieder den Knopf **Start/Stop** an. Die rote Farbe des Pfeils deutet an, dass die Datenaufnahme abgeschlossen ist. In der Anzeige **End of Measurement** erscheint das Datum und die Uhrzeit bei Beendigung der Messung.

Hat man vor, eine neue Kalibration vorzunehmen, z.B. falls man ein anderes Messgerät anschließen oder einen Druckbereich zur Kontrolle durch Messung noch einmal überprüfen will, so schaltet man den Knopf **Start/Stop** wieder ein. Die Kalibration erfolgt erneut und eine neue ASCII-Datei mit den neuen Messdaten wird generiert.

Abbildung A.1 zeigt eine Text-Datei, die ein Protokoll der Kalibration darstellt. In der ersten Zeile befindet sich der Name der Datei, die zweite Zeile gibt Auskunft darüber, mit welcher Software die Messdaten aufgenommen wurden. In den folgenden Zeilen findet man dieselben Informationen, die auch im *VI* während der Messung angezeigt wurden. Die Erkennung erfolgt durch die standardisierten Schlüsselwörter, die sich am Anfang der Zeilen befinden. Die gemessenen temporären Daten werden in der Datei in Form einer Tabelle wiedergegeben. Um einen bequemen Zugriff auf diese Daten zu ermöglichen, wird die Tabelle mit `$BEGIN_TAB` am Anfang und mit `$END_TAB` am Ende der Tabelle gekennzeichnet.

```

$FILENAME c:\gas_calib_PG4-02-007_020724_1030_sensA_magn_1.95T_paral.txt
$SOFTWARE GAS_CALIBRATION_V1.1AC
// Connected Devices -----
$PRESSURE_BOX_REFERENCE PG4-01/004
$SENS_1_TYPE 500 mbar rel (Group A)
$SENS_2_TYPE 500 mbar rel (Group A)
$SENS_3_TYPE 100 mbar rel (Group B)
$SENS_4_TYPE 100 mbar rel (Group B)
$PORT_NUMB 1
// Unit being calibrated -----
$PRESSURE_BOX_CALIBRATED PG4-01/007
$PORT_NUMB 2
$SUPPL_VOLT 12
// Start Parameters -----
$MEAS_INTERVAL 10 // [s] (Measurement every 10 s)
$PO_SENS_1 -358 // [mbar] (pressure at Start Time)
$PO_SENS_2 -358 // [mbar] (pressure at Start Time)
$PO_SENS_3 -121 // [mbar] (pressure at Start Time)
$PO_SENS_4 -123 // [mbar] (pressure at Start Time)
$ATM_PRESS 997 // [mbar]
$AIR_TEMP 24,5 // [°C]
$AIR_HUMID 47 // [%]
// Beginning of Measurement -----
$BEGIN_MEAS 24.07.02 10:30:16
//
// Measured Data
//
// A = Time [h:m:s]
// B = Time [s]
// C = Voltage Supplied
// D = Reference Pressure Sensor 1 [mbar]
// E = Reference Pressure Sensor 2 [mbar]
// F = Reference Pressure Sensor 3 [mbar]
// G = Reference Pressure Sensor 4 [mbar]
// H = Calibrated Pressure Sensor 1 [digit]
// I = Calibrated Pressure Sensor 2 [digit]
// J = Calibrated Pressure Sensor 3 [digit]
// K = Calibrated Pressure Sensor 4 [digit]
//
// -----
// A      B      C      D      E      F      G      H      I      J      K
// -----
$BEGIN_TAB
00:00:01      1      12,0 -358.0 -358.0 -121.0 -123.0  10      7      11      7
00:00:11     11      12,0 -358.0 -358.0 -121.0 -123.0  10      7      11      7
00:00:21     21      12,0 -358.0 -358.0 -121.0 -123.0  10      7      11      7
00:00:31     31      12,0 -358.0 -358.0 -121.0 -123.0  10      7      11      7
00:00:41     41      12,0 -358.0 -358.0 -121.0 -123.0  10      7      11      7
00:00:51     51      12,0 -358.0 -358.0 -121.0 -123.0  10      7      11      7
.
.
.
.
.
.
.
00:51:41  3101      12,0  328.0   328.0  107.0  107.0   255   255   255   255
00:51:51  3111      12,0  328.0   328.0  107.0  107.0   255   255   255   255
00:52:01  3121      12,0  328.0   328.0  107.0  107.0   255   255   255   255
00:52:11  3131      12,0  328.0   328.0  107.0  107.0   255   255   255   255
00:52:21  3141      12,0  328.0   328.0  107.0  107.0   255   255   255   255
$END_TAB
//
// End of Measurement -----
$END_MEAS 24.07.02 11:22:41
$POINTS_MEAS 315
$ELAPSED_TIME 00:52:25
$PRESS_MAX_A 328 // [mbar]
$PRESS_MIN_A -361 // [mbar]
$PRESS_MAX_B 328 // [mbar]
$PRESS_MIN_B -361 // [mbar]

```

Abbildung A.1: Eine ASCII-Datei mit den Messdaten. Die registrierten Messdaten werden in Form einer Tabelle (hier unterbrochen dargestellt wegen Platzmangel) wiedergegeben.

## ANHANG

Um dem Benutzer eine Orientierung zu verschaffen, beinhaltet der Dateiname folgende Angaben (siehe Abbildung A.2):

- Name der Software, mit der die Kalibration vorgenommen wurde.
- Bezeichnung des zu kalibrierenden Messdruckgerätes.
- Datum.
- Uhrzeit.
- Eventuell die Bedingungen, unter welchen die Sensoren kalibriert wurden.

```
gas_calib_v1.1_PG4-02-007_020724_1030_sensA_magn_1.95T_parallel.txt
```



**Abbildung A.2:** Beispiel für den Namen einer ASCII-Datei mit den Messdaten. Die Kalibration erfolgte mit Hilfe der Software *Gas Calibration v1.1* am 24. Juli 2002, und wurde um 10.30 Uhr begonnen. Kalibriert wurde das Messgerät *PG4-02-007* mit zwei Sensoren im Magnetfeld der Stärke 1,95 T mit paralleler Orientierung relativ zu den Flusslinien (siehe auch Abschnitt 3.4.3).

## B. Die Software „*Gas Tightness v1.2*“

Um das Programm zu starten, zu unterbrechen oder zu beenden sind die *LabVIEW*-spezifischen Schritte, die bereits im Anhang A beschrieben worden sind, zu befolgen.

Vor der Messung werden vom Benutzer ein paar Angaben verlangt. Dies wird durch Eintippen bzw. Anklicken an folgenden Stellen des *VI* bewerkstelligt:

– Für das zu testende Objekt (Kammer bzw. Superlage):

- **Select SL/DT Size:** Bezeichnung der Größe der Kammer bzw. Superlage. Sie ist abhängig davon, für welche Kammerschicht des CMS-Rads die Kammer bzw. Superlage bestimmt ist (MB1, MB2, MB3 oder MB4).
- **Select SL/DT Type:** Bezeichnung des Typs von Superlage ( $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\phi$  invertiert oder  $\theta$  invertiert) oder der ganzen Kammer (DT).
- **Select SL/DT Serial Number:** Laufende Produktionsnummer der Kammer bzw. Superlage.

– Für das Referenzmanometer:

- **Set Port Number:** Nummer der seriellen Schnittstelle (1 bis 10), an die das Referenzmanometer *PG4* angeschlossen ist.

– Für den zeitlichen Ablauf des Dichtigkeitstests:

- **Measure every ... s:** Zeitintervall (in Sekunden), das zwischen zwei Punkten liegt, an welchen die Messdaten abgelesen werden sollten.

– Für die äußeren Parameter (bei Beginn des Dichtigkeitstests):

- **Atmospheric Pressure:** Umgebungsdruck (in mbar).
- **Air Temperature:** Umgebungstemperatur (in °C).

- **Air Humidity:** relative Luftfeuchtigkeit (in %).

Um die Messung zu beginnen, klickt man den Knopf **Start/Stop** an. Der Pfeil an diesem Knopf ändert seine Farbe von rot (keine Messung) auf grün (Messung gestartet). Nach kurzer Zeit sollten folgende Daten, deren Inhalte während der Messung ständig aktualisiert werden, in den folgenden Anzeigefeldern erscheinen:

- **Device Type/Ser. No.:** Bezeichnung des Manometers *PG4*.
- **Sensor 1 Type (Group A), Sensor 2 Type (Group A), Sensor 3 Type (Group B), Sensor 4 Type (Group B):** Typ des Sensors 1 bis 4 des Manometers; wird durch Angabe des Messbereichs und der Art der Druckmessung (relativ oder absolut) angegeben.
- **Number of Points Measured:** zeigt die Anzahl der Messpunkte, an denen die Messdatenaufnahme bereits erfolgte.
- **Current Date/Time:** zeigt Datum und aktuelle Uhrzeit an.
- **Beginning of Measurement:** zeigt Datum und Uhrzeit zu Beginn des Gasdichtigkeitstests an.
- **Elapsed Time:** zeigt die verstrichene Zeit von Beginn des Gasdichtigkeitstests an (in Stunden, Minuten und Sekunden).
- **Time since Last Point:** zeigt die seit dem letzten Messpunkt verstrichene Zeit (in Sekunden) an.
- **Time to Next Point:** zeigt die bis zum nächsten Messpunkt verbleibende Zeit an.
- **Pressure Sensor 1 (A), Pressure Sensor 2 (A), Pressure Sensor 3 (B), Pressure Sensor 4 (B):** zeigt den Druckwert (in mbar) jedes Drucksensors an.
- **Pressure Max (A), Pressure Min (A), Pressure Max (B), Pressure Min (B):** zeigt den maximalen bzw. minimalen Druckwert (in mbar), der während des Dichtigkeitstests gemessen wurde, an.
- **Sensor 1, Sensor 2, Sensor 3, Sensor 4** (unterhalb der Markierung **Current Value of Time Constant**): zeigt den momentanen Wert der Zeitkonstanten für jeden Sensor, berechnet nach der Formel (4.9)<sup>1</sup>.
- **Write to File:** zeigt den Pfad an, in den die Datei mit den Messdaten geschrieben wird. Der Name der Datei und der Pfad werden automatisch generiert (siehe unten).
- Rechts am Bildschirm zeigen vier Diagramme den zeitlichen Verlauf des Drucks, gemessen von jedem Sensor des *PG4*-Manometers. Die Abszissen werden automatisch an die verstrichene Messzeit angepasst. Die Ordinaten, die die Druckwerte angeben, werden ebenfalls automatisch an die Daten angeglichen.

Um die Messung zu beenden, klickt man wieder den Knopf **Start/Stop** an. Die rote Farbe des Pfeils deutet an, dass die Datenaufnahme abgeschlossen ist. In der Anzeige **End of Measurement** erscheint das Datum und die Uhrzeit bei Beendigung der Messung. Durch erneutes Anklicken des Knopfes **Start/Stop** wird eine neue Messung initiiert, und eine neue ASCII-Datei mit den neuen Messdaten wird generiert.

Die Daten, die in einem Gasdichtigkeitstest gemessen wurden, werden in eine ASCII-Datei geschrieben (Abbildung A.3). In der ersten Zeile befindet sich der Name der Datei, die zweite Zeile gibt Auskunft darüber, mit welcher Software die Messdaten aufgenommen wurden. In den folgenden Zeilen findet man dieselben Informationen, die auch im *VI* während der Messung angezeigt wurden. Die Erkennung erfolgt durch die standardisierten Schlüsselworte, die sich am Anfang der Zeilen befinden. Die gemess-

---

<sup>1</sup> Da die Zeitkonstante  $\tau_1$  anhand von zwei Messpunkten *jedes* Sensors berechnet wird, und die Sensoren ihrerseits Schwankungen um 1 bit (entspricht ca. 3 mbar für *MPX2050DP*- bzw. 1 mbar für *MPX2010DP*-Sensoren bei 8-bit ADC) aufweisen können, kann es durchaus vorkommen, dass die Anzeigen verschiedene Werte für  $\tau_1$  liefern. Paradoxiertweise tritt dies in Erscheinung bei sehr dichten Objekten, da hier der Druckabfall nahezu null ist. Bei Objekten mit  $\tau_1 < 1000$  min und bei hinreichend langer Messzeit sind die angezeigten Werte der Zeitkonstanten für jeden Sensor ungefähr gleich.

## ANHANG

```
$FILENAME c:\gastightness_MB1SLphi019_020228_1932.txt
$SOFTWARE GASTIGHTNESS_TEST_V1.0AC
// Connected Devices -----
$SL/DT MB1SLphi019
$PRESSURE_BOX PG4-01/005
$SENS_1_TYPE 500 mbar rel (Group A)
$SENS_2_TYPE 500 mbar rel (Group A)
$SENS_3_TYPE 100 mbar rel (Group B)
$SENS_4_TYPE 100 mbar rel (Group B)
$PORT_NUMB 1
// Start Parameters -----
$MEAS_INTERVAL 120 // [s] (Measurement every 120 s)
$PO_SENS_1 50 // [mbar] (pressure at Start Time)
$PO_SENS_2 50 // [mbar] (pressure at Start Time)
$PO_SENS_3 54 // [mbar] (pressure at Start Time)
$PO_SENS_4 54 // [mbar] (pressure at Start Time)
$ATM_PRESS 975 // [mbar]
$AIR_TEMP 23 // [°C]
$AIR_HUMID 20 // [%]
// Beginning of Measurement -----
$BEGIN_MEAS 28.02.02 19:32:37
//
// Measured Data
// A = Time [h:m:s]
// B = Time [s]
// C = Time Constant Sensor 1 [min]
// D = Time Constant Sensor 2 [min]
// E = Time Constant Sensor 3 [min]
// F = Time Constant Sensor 4 [min]
// G = Pressure Sensor 1 [mbar]
// H = Pressure Sensor 2 [mbar]
// I = Pressure Sensor 3 [mbar]
// J = Pressure Sensor 4 [mbar]
// K = Pressure Sensor 1 [digit]
// L = Pressure Sensor 2 [digit]
// M = Pressure Sensor 3 [digit]
// N = Pressure Sensor 4 [digit]
//
// -----
// A      B      C      D      E      F      G      H      I      J      K      L      M      N
// -----
$BEGIN_TAB
00:00:15  15      0      0      0      0      50.0  50.0  54.0  54.0  157  156  199  198
00:02:15  135     Inf     Inf     Inf     Inf     50.0  50.0  54.0  54.0  157  156  199  198
00:04:15  255     Inf     Inf     Inf     Inf     50.0  50.0  54.0  54.0  157  156  199  198
00:06:15  375    -159     Inf    -341     Inf     52.0  50.0  55.0  54.0  158  156  198  198
00:08:15  495    -210     Inf    -450     Inf     52.0  50.0  55.0  54.0  157  157  199  198
00:10:15  615    -261     Inf    -559     Inf     52.0  50.0  55.0  54.0  157  157  199  198
00:12:15  735    -312     Inf     Inf     Inf     52.0  50.0  54.0  54.0  157  156  199  197
00:14:15  855     Inf     Inf     Inf     Inf     50.0  50.0  54.0  54.0  157  156  198  197
:
:
:
15:42:15 56535  2268  2268  2324  2492  33.0  33.0  36.0  37.0  151  150  179  179
15:44:15 56655  2272  2272  2498  2498  33.0  33.0  37.0  37.0  151  150  179  178
15:46:15 56775  2277  2277  2334  2503  33.0  33.0  36.0  37.0  151  150  179  179
$END_TAB
//
// End of Measurement -----
$END_MEAS 01.03.02 11:20:01
$POINTS_MEAS 474
$ELAPSED_TIME 15:47:24
$PRESS_MAX_A 55 // [mbar]
$PRESS_MIN_A 33 // [mbar]
```

**Abbildung A.3:** Eine ASCII-Datei mit den Messdaten. Die registrierten Messdaten werden in Form einer Tabelle (hier unterbrochen dargestellt wegen Platzmangel) wiedergegeben.

senen temporären Daten werden in der Datei in Form einer Tabelle wiedergegeben. Um einen bequemen Zugriff auf diese Daten zu ermöglichen, wird die Tabelle mit \$BEGIN\_TAB am Anfang und mit \$END\_TAB am Ende der Tabelle gekennzeichnet.

Der Dateipfad und Dateiname werden durch die Software automatisch generiert. Der Dateiname beinhaltet folgende Angaben (siehe Abbildung A.4):

- Name der Software, mit der die Messung vorgenommen wurde.
- Bezeichnung des getesteten Objekts (Myonkammer oder Superlage).
- Datum.
- Uhrzeit.

gastightness\_MB1SLphi019\_020228\_1932.txt

The diagram shows the filename 'gastightness\_MB1SLphi019\_020228\_1932.txt' with red brackets underneath it. The brackets are labeled as follows: 'Software' under 'gastightness\_', 'Getestetes Objekt' under '\_MB1SLphi019\_', 'Datum' under '\_020228\_', and 'Uhrzeit' under '\_1932.txt'.

**Abbildung A.4:** Beispiel für den Namen einer ASCII-Datei mit den Messdaten. Der Dichtigkeitstest erfolgte mit Hilfe der Software *Gas Tightness* am 28. Februar 2002, um 19.32 Uhr. Getestet wurde die Superlage Nr. 19 vom Typ  $\phi$ .





## Quellennachweis

- [1] Sextus Empiricus: *Gegen die Wissenschaftler* 7,135; in *Griechische Atomisten*, Verlag Philipp Reclam, Leipzig 1988.
- [2] A. Derdzinski: *Geometry of the Standard Model of Elementary Particles*; Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1992.
- [3] N. Polonski: *Supersymmetry: Structure and Phenomena, Extensions of Standard Model*; Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2001.
- [4] K. Hagiwara et al.: *Review of Particle Physics*; Physical Review, **D66** 010001 (2002).
- [5] Luxorion L'Univers inflationnaire, La détente du faux vide (III); <http://www.astrosurf.com/lombry/cosmos-inflation3.htm>.
- [6] LEP Higgs Working Group: *Search for the Standard Model Higgs Boson at LEP*, LHWG Note 2001-03 **CERN-EP/2001-055**, 11. Juli 2001.
- [7] The History of Antimatter: The Accelerator Era; <http://livefromcern.web.cern.ch/livefromcern/antimatter/history/AM-history02-b.html>.
- [8] A. Quandt: *Suche nach dem Higgs-Boson Teil 4*; Vortrag Mainzer Klausurtagung-Bullay, August 2001; [http://butler.physik.uni-mainz.de/bullay/aa\\_higgs\\_teil4.pdf](http://butler.physik.uni-mainz.de/bullay/aa_higgs_teil4.pdf).
- [9] G. L. Bayatian et al., CMS Collaboration: *The CMS Muon Project Technical Design Report*; Bericht **CERN/LHCC 97-32 (1997)**.
- [10] E. Hermens, Photographien.
- [11] H. Reithler, Dateien.
- [12] W. Blum, L. Rolandi: *Particle Detection with Drift Chambers*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1994.
- [13] H. Faissner et al.: *Performance of a Wall-Less Drift Chamber for Muon Detector*; Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, **A 356 (1995)** 280-285.
- [14] *Motorola Semiconductor Technical Data*; Motorola Inc. 2002; <http://www.motorola.com/semiconductors>.
- [15] F. Adamczyk, persönliche Mitteilung.
- [16] MKS Instruments; <http://www.mkinst.com>.

## QUELENNACHWEIS

- [17] M. Huhtinen: *Recommendations for Irradiations of CMS Components in the IRRAD2 Facility at PS*; Bericht **CMS IN-2001/012**, 2. April 2001. Wir danken an dieser Stelle Herrn M. Glaser/CERN für die Durchführung der Bestrahlung.
- [18] H. Reithler, persönliche Mitteilung. Wir danken an dieser Stelle Herrn H. Reithler für die Durchführung der Messung.
- [19] H. Zoebel: *Strömung durch Röhre und Ventile*; Springer Verlag, Wien 1982.
- [20] W. Bohl: *Technische Strömungslehre*; Vogel Buchverlag, Würzburg 1998.
- [21] W. Pupp, K. H. Hartmann: *Vakuumtechnik. Grundlagen und Anwendungen*, Fackler Verlag, Leipzig 1991.
- [22] The CMS Drift Tube Chambers Collaboration Group: *Drift Tubes Quality Control Manual and Procedures, Draft 6.2*; 4. Juni 2001.
- [23] Swagelok Valve Sizing; <http://www.perthvalve.com.au>.
- [24] K. Höpfner: *Status of Production at Aachen Site*; Vortrag CERN; 3. Dezember 2002; [http://www.physik.rwth-aachen.de/~reithler/talks\\_DT\\_021202CMSweek/021203status\\_Aachen\\_DT.pdf](http://www.physik.rwth-aachen.de/~reithler/talks_DT_021202CMSweek/021203status_Aachen_DT.pdf).
- [25] B. Philipps, persönliche Mitteilung.
- [26] TATA Honeywall Gas Analyses, Micro-Fuel Cells; [http://www.tatahoneywall.com/html/ga\\_oa\\_ect\\_brmf.htm](http://www.tatahoneywall.com/html/ga_oa_ect_brmf.htm).

# Danksagung

Bei der Realisierung meiner Diplomarbeit im III. Physikalischen Institut A der RWTH Aachen konnte ich Erfahrungen in systematischer Vorgehensweise bei Durchführung der Vorbereitungen und Schaffung einer Infrastruktur für ein wichtiges Experiment der Elementarteilchenphysik sammeln. Die interessanten Aufenthalte im CERN gaben mir einen Einblick in die Organisation und Arbeit einer großen internationalen wissenschaftlichen Kollaboration.

Daher gilt mein erster Dank Herrn Prof. Dr. T. Hebbeker für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit, und somit für den Entschluss, mir die damit verbundenen Aufgaben anzuvertrauen. Herrn Prof. Dr. M. Tonutti danke ich für die spontane Bereitschaft, als zweiter Gutachter zu fungieren, stellvertretend für Herrn Prof. Dr. A. Boehm, der kurz vor Abschluss dieser Arbeit einen schweren Unfall erlitten hat. Herrn Boehm wünsche ich an dieser Stelle eine schnelle Genesung.

Besonderer Dank gilt Herrn Dr. H. Reithler, ohne dessen Betreuung diese Arbeit nie in dieser Form und Umfang hätte bewerkstelligt werden können. Seine konstruktiven Ratschläge betreffs der Methode, Ausführung und Effizienz der Kalibrationen und Messungen waren stets ausgesprochen nützlich. Seinen Sachkenntnissen ist es zu verdanken, dass die Durchführung der Tests reibungslos verlief. Er hat nie Mühe und Zeit gespart, mich bei der Auswertung und Deutung der Messergebnisse mit lehrreichen Anregungen und Informationen zu versorgen. Besonders schätze ich die vielen mit ihm geführten Gespräche, deren Inhalte weit über die in meiner Diplomarbeit behandelten Aspekte hinaus gingen.

Frau Dr. K. Hoepfner bin ich dankbar für die Einführung in den Aachener Myonkammerbau, sowie für Vorschläge bezüglich der Gestaltung der Gasdichtigkeitstests.

Herrn O. Tsigenov bin ich dankbar für die Hilfe bei der Bewältigung der Probleme während der Softwareentwicklung. Mein Dank gilt den Kollegen der Mechanik- und Elektronikabteilung, besonders Herrn B. Philipps, W. Reuter, E. Hermens, G. Hilgers und F. Adamczyk, die mir sehr oft Hilfe beim Aufbau und Ausstattung der Messapparatur geleistet haben.

Dass die Arbeit in einer angenehmen Atmosphäre verlief, verdanke ich vor allem den Diplomanden und Doktoranden M. Bontenackels, Ch. Autermann und T. Stapelberg.

Frau I. Gojdie danke ich dafür, dass sie ihre private Zeit geopfert hat, um mein Manuskript zu lesen und zu korrigieren.

Nicht zuletzt möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Mutter und meiner Freundin bedanken. Die seelische und materielle Unterstützung ihrerseits trug in großem Maß dazu bei, meine Diplomarbeit zu verwirklichen.