

---

# Messung von Transferkoeffizienten einer GEM-Auslesestruktur

---

Bachelorarbeit in Physik  
von  
Christoph Krieger

angefertigt am  
Physikalischen Institut der Universität Bonn

vorgelegt der  
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der  
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Juli 2009



1.Gutachter: Prof. Dr. Klaus Desch  
2.Gutachter: Dr. Hans Krüger



## Zusammenfassung

Eine vielversprechende Auslesestruktur für Zeitprojektionskammern verwendet Gas-Electron-Multiplier-Folien (GEM-Folien) für die Gasverstärkung. Eine solche GEM-Auslesestruktur bietet verschiedene Vorteile, unter anderem eine intrinsische Reduktion der rückdriftenden Ionen. Das Verhalten der Elektronen- und Ionenströme innerhalb einer solchen GEM-Auslesestruktur wird durch Transferkoeffizienten beschrieben. Bei Kenntnis der Transferkoeffizienten können die Ströme in einer GEM-Auslesestruktur simuliert werden, um die verwendeten Einstellungen in Hinblick auf angestrebte Verstärkung und minimalen Ionenrückdrift zu optimieren.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Wiederinbetriebnahme eines Messstandes zur Bestimmung von Transferkoeffizienten sowie der Messung und Parametrisierung von Transferkoeffizienten. Zunächst wird dazu eine bereits parametrisierte Gasmischung aus 93% Argon, 2% CO<sub>2</sub> und 5% CH<sub>4</sub> erneut vermessen, um die Ergebnisse mit den bereits vorhandenen Parametrisierungen zu vergleichen. Anschließend wird eine, zuvor noch nicht parametrisierte, Gasmischung aus 70% Argon und 30% CO<sub>2</sub> vermessen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zeitprojektionskammern</b>	<b>1</b>
1.1	Gas Electron Multiplier <i>GEM</i> . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Transferkoeffizienten</b>	<b>5</b>
2.1	Definition der Transferkoeffizienten . . . . .	5
2.1.1	Sammeleffizienz für Elektronen . . . . .	5
2.1.2	Extraktionseffizienz für Elektronen . . . . .	5
2.1.3	Verstärkung zwischen den GEMs . . . . .	5
2.1.4	Verstärkung in einer einzelnen GEM . . . . .	6
2.1.5	Sammeleffizienz für Ionen . . . . .	6
2.1.6	Primäre Extraktionseffizienz für Ionen . . . . .	6
2.1.7	Sekundäre Extraktionseffizienz für Ionen . . . . .	6
2.2	Parametrisierungen der Transferkoeffizienten . . . . .	7
2.2.1	Sammeleffizienz für Elektronen . . . . .	7
2.2.2	Extraktionseffizienz für Elektronen . . . . .	7
2.2.3	Verstärkung zwischen den GEMs . . . . .	8
2.2.4	Verstärkung in einer einzelnen GEM . . . . .	8
2.2.5	Sammeleffizienz für Ionen . . . . .	8
2.2.6	Primäre Extraktionseffizienz für Ionen . . . . .	8
2.2.7	Sekundäre Extraktionseffizienz für Ionen . . . . .	8
2.3	Berechnung aus messbaren Größen . . . . .	9
2.3.1	Sammeleffizienz für Elektronen . . . . .	9
2.3.2	Extraktionseffizienz für Elektronen und Verstärkung zwischen den GEMs . . . . .	9
2.3.3	Verstärkung in einer einzelnen GEM . . . . .	9
2.3.4	Sammeleffizienz für Ionen . . . . .	10
2.3.5	Primäre Extraktionseffizienz für Ionen . . . . .	10
2.3.6	Sekundäre Extraktionseffizienz für Ionen . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Aufbau des Messtandes</b>	<b>13</b>
3.1	Strommesskammer . . . . .	13
3.2	Messung der Ströme . . . . .	14
3.3	Software zur Steuerung der Messungen . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Messung der Transferkoeffizienten</b>	<b>15</b>
4.1	Messungen mit TDR-Gas . . . . .	15
4.2	Transferkoeffizienten für Ar:CO <sub>2</sub> 70:30 . . . . .	21
4.3	Vergleich der Gasmischungen . . . . .	25
<b>5</b>	<b>Fazit</b>	<b>27</b>
<b>A</b>	<b>Auffälliges Verhalten der Ionen-Sammeleffizienz</b>	<b>29</b>
<b>B</b>	<b>Tabellen</b>	<b>31</b>
<b>C</b>	<b>Abbildungen</b>	<b>33</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>37</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>39</b>



---

# 1 Zeitprojektionskammern

Zeitprojektionskammern sind Detektoren zur Spurrekonstruktion. Der Aufbau einer Zeitprojektionskammer ist in Abbildung 1.1 skizziert. Eine Zeitprojektionskammer, auf englisch Time Projection Chamber *TPC*, besteht im Wesentlichen aus einem meist zylinderförmigen Gasvolumen, dem Driftvolumen. Innerhalb dieses Driftvolumens wird ein starkes homogenes elektrisches Feld, das Driftfeld  $E_D$ , erzeugt. Um ein möglichst homogenes elektrisches Feld zu erhalten, wird meist ein spezieller Feldkäfig genutzt. Passiert nun ein geladenes Teilchen die TPC, so erzeugt es innerhalb des Driftvolumens entlang seiner Flugbahn Elektron-Gasionen-Paare. Durch das Driftfeld beginnen die Ionen zur einen Seite und die Elektronen zur anderen Seite des Volumens zu driften. Dabei driften die Elektronen bzw. Ionen mit der mittleren Geschwindigkeit

$$\vec{v}_{e-/I^+} = \mu_{e-/I^+} \cdot \vec{E}_D \quad (1.1)$$

wobei  $\mu_{e-/I^+}$  die Beweglichkeit der Elektronen bzw. Ionen in dem gewählten Gas bezeichnet. Die Beweglichkeit  $\mu_{e-}$  für Elektronen ist stark abhängig von der Driftfeldstärke  $|E_D|$ .

Am Ende des Driftvolumens treffen die Ionen auf die Kathode, die Elektronen auf eine Auslesestruktur. Die Auslesestruktur befindet sich dabei in einer Ebene senkrecht zur Driftrichtung der Elektronen. Somit wird die Spur des ursprünglichen Teilchens auf die Ebene der Auslesestruktur projiziert. Dort findet eine orts aufgelöste Detektion der eintreffenden Elektronen statt. Dies lässt sich zum Beispiel durch Verwenden einer zweidimensional segmentierten Ausleseebene (Padebene) realisieren. Durch das gleichzeitige Messen der Driftzeit der Elektronen, also der Zeit, die sie von ihrem Erzeugungsort bis zur Ausleseebene gedriftet sind, lässt sich über die bekannte Driftgeschwindigkeit die Komponente der Spur senkrecht zur Ausleseebene rekonstruieren. Somit können mit einer TPC Teilchenspuren dreidimensional rekonstruiert werden, wodurch TPCs ebenfalls eine sehr gute Trennung von mehreren Teilchenspuren ermöglichen.

Unabhängig von dem verwendeten Detektortyp in der Ausleseebene müssen die ankommenden Elektronen zunächst vervielfacht werden, um sie überhaupt detektieren zu können. Die Vervielfachung der Elektronen erfolgt dabei über Gasverstärkung mittels sehr hoher elektrischer Felder. Innerhalb dieser elektrischen Felder werden die ankommenden Elektronen so stark beschleunigt, dass sie innerhalb der mittleren freien Weglänge genug Energie aufnehmen, um weitere Gasatome bzw. -moleküle zu ionisieren, wodurch es zur lawinenartigen Vervielfachung der primären Elektronen kommt. Um zu verhindern, dass Photonen, welche bei der Gasverstärkung durch Rekombination von Elektron und Ion auftreten, an anderen Stellen durch Photoeffekt weitere Verstärkungs-Lawinen auslösen, muss das Gasgemisch einer TPC ein sogenanntes Löschgas (zum Beispiel  $\text{CO}_2$ ) enthalten, da sonst die Ortsauflösung verloren gehen würde. Ein solches Löschgas absorbiert die entstehenden Photonen, ohne dabei ionisiert zu werden.

Bei der Gasverstärkung entstehen ebenfalls Ionen, in der gleichen Anzahl wie Elektronen. Die somit entstandene Ionenwolke driftet von der Auslese- und Gasverstärkungsstruktur zurück ins Driftvolumen. Dies ist aus mehreren Gründen unerwünscht: Zum einen verzerrt und verändert die driftende Ladungswolke das elektrische Feld im Driftvolumen, zum anderen können die primären Elektronen einer weiteren, später entstandenen Teilchenspur mit einer ihnen entgegendriftenden Ionenwolke teilweise rekombinieren. Eine Möglichkeit, den Einfluss der rückdriftenden Ionen zu verringern, besteht darin, dass sich vor der Gasverstärkungsstruktur ein Ionengatter befindet. Dieses besteht aus Drähten, die abwechselnd auf ein gegenüber des nominellen Potentials an ihrer Position im Driftvolumen negatives und positives Potential gelegt werden können. Durch Aktivieren dieses Ionengatters können rückdriftende Ionen nicht passieren. In der Zeit, in der das Ionengatter aktiv ist, können jedoch keine weiteren Spuren detektiert werden.

Das zum Betrieb einer TPC verwendete Gasgemisch sollte eine möglichst geringe Diffusion besitzen, um die Ortsauflösung nicht zu verschlechtern. Weiterhin ist es wünschenswert, dass

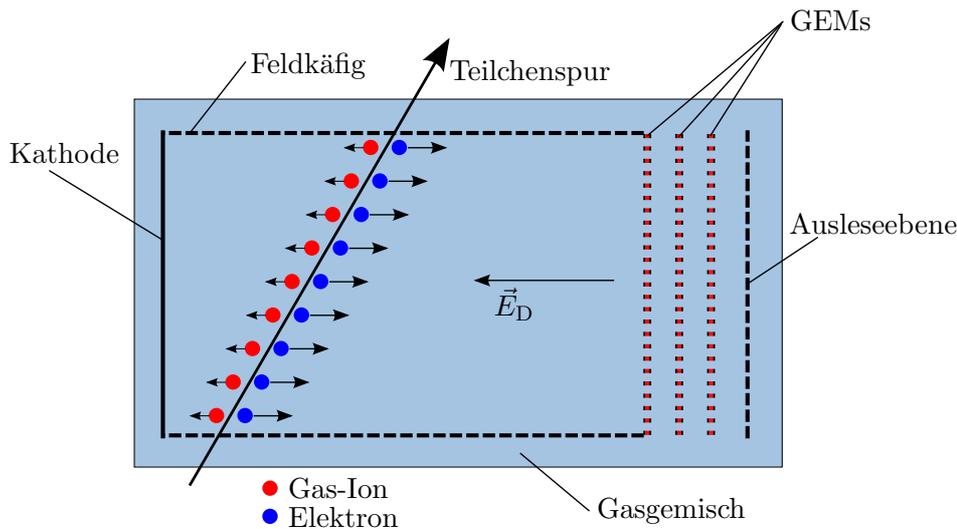


Abbildung 1.1: Schematischer Aufbau einer Zeitprojektionskammer mit GEMs

die Beweglichkeit für Elektronen bei der verwendeten Stärke des Driftfeldes ein Plateau besitzt, somit in der Umgebung der Driftfeldstärke weitestgehend konstant ist. Dadurch wirken sich leichte Inhomogenitäten oder Verzerrungen des Driftfeldes nicht auf die Driftgeschwindigkeit und damit nicht auf die Auflösung senkrecht zur Ausleseebene aus.

Im Normalfall wird eine TPC innerhalb eines Magnetfeldes betrieben, wobei das magnetische Feld parallel zum Driftfeld steht. Dies führt einerseits dazu, dass die Diffusion senkrecht zur Driftrichtung durch das Magnetfeld verringert wird. Andererseits ermöglicht das Magnetfeld eine Bestimmung des Impulsanteils senkrecht zum Magnetfeld über die Bestimmung der Krümmung der gemessenen Spuren.

Um die Gasverstärkung bzw. Vervielfachung der primären Elektronen zu realisieren, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung einer Gasverstärkungsstruktur aus Gas-Electron-Multiplier-Folien (GEM-Folien) [6]. Im Folgenden wird auf eine solche GEM-Auslesestruktur näher eingegangen. Weitere Möglichkeiten sind die Verwendung von MICROME GAS [3] oder Anodendrähten. Bei letzteren findet die Gasverstärkung, ähnlich wie in einem Geiger-Müller-Zählrohr, in der Nähe von Drähten statt, die an eine Hochspannung angeschlossen sind. Dies führt dazu, dass sich in der Umgebung der Drähte ein starkes elektrisches Feld ergibt, in welchem Gasverstärkung stattfinden kann. Bei MICROME GAS befindet sich die Gasverstärkungsstruktur direkt auf einer Ausleseebene (Padebene). Auf der Oberseite der Ausleseebene sind dabei kleine Abstandshalter (Höhe 50 bis 100  $\mu\text{m}$ ) aus einem Isolatormaterial aufgebracht, auf diesem wiederum befindet sich ein dünnes Metallnetz. Zwischen dieses Netz und der Ausleseebene wird dann eine Hochspannung angelegt. Bei MICROME GAS findet die Gasverstärkung zwischen der Ausleseebene und dem Metallnetz statt.

### 1.1 Gas Electron Multiplier *GEM*

GEM-Folien bestehen aus einer Kapton-Folie, die beidseitig mit einer Kupfereauflage versehen ist und in die Löcher geätzt wurden. Legt man nun zwischen Ober- und Unterseite einer solchen GEM eine Hochspannung von mehreren hundert Volt an, so entsteht in den Löchern der GEM ein starkes elektrisches Feld, so dass in einem solchen Loch Gasverstärkung stattfinden kann. Bezüglich des Ionenrückdrifts bieten GEMs den Vorteil, dass aufgrund des Verlaufs der Feldlinien an den Löchern (siehe Abbildung 2(a)) erzeugte Ionen zum Teil bereits auf den GEM-Oberflächen

eingefangen werden.

Die für die Auslesestruktur, welche zur Bestimmung der Transferkoeffizienten genutzt wird, verwendeten Standard GEMs [6] bestehen aus einer  $50\ \mu\text{m}$  dicken Kaptonfolie mit beidseitiger  $5\ \mu\text{m}$  Kupferauflage. Die Löcher sind hexagonal angeordnet mit einem Abstand von  $140\ \mu\text{m}$ . Der Durchmesser der Löcher beträgt  $50 \pm 5\ \mu\text{m}$  im Kapton und  $70 \pm 5\ \mu\text{m}$  in den Kupferauflagen. In Abbildung 2(b) befindet sich eine Raster-Elektronenmikroskop-Aufnahme einer GEM. Eine solche ‘Standard’ GEM besitzt eine aktive Fläche von  $10 \times 10\ \text{cm}^2$  und eine optische Transparenz von ungefähr 17%.

Die elektrische Feldstärke in den Löchern einer GEM  $E_{\text{Loch}}$  ergibt sich aus der angelegten Spannung  $U_{\text{GEM}}$  und den elektrischen Feldern ober- und unterhalb der GEM nach [7] zu

$$E_{\text{Loch}} = a \cdot U_{\text{GEM}} + b \cdot (E_{\text{oben}} + E_{\text{unten}}) \quad (1.2)$$

wobei sich für die verwendeten Standard GEMs

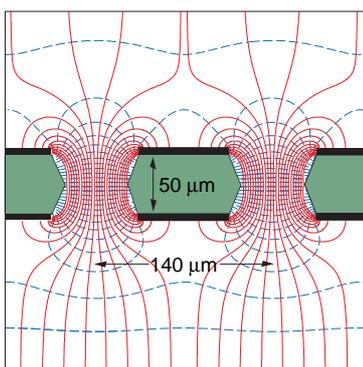
$$a = 142,87\ \text{cm}^{-1} \quad (1.3)$$

$$b = 0,0623 \quad (1.4)$$

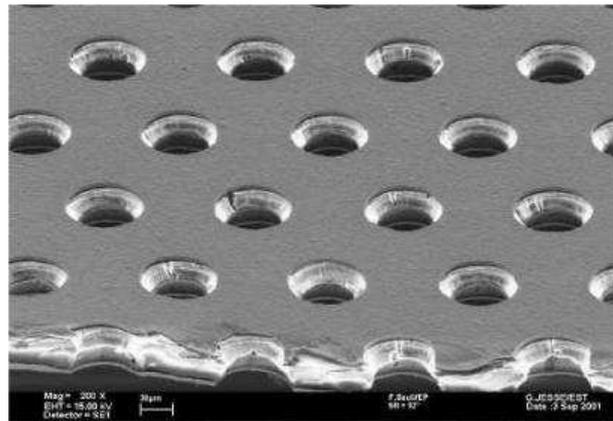
ergibt [7].

Typischerweise benutzt man nicht eine einzelne GEM für die Gasverstärkung, sondern einen Stapel aus mehreren GEMs, wobei zwischen den GEMs elektrische Felder für den Transport der Ladungsträger erzeugt werden. Diese werden als Transferfelder  $E_{\text{T}}$  bezeichnet. Das elektrische Feld zwischen der letzten GEM und der eigentlichen Auslese bezeichnet man als Induktionsfeld  $E_{\text{I}}$ .

Da die meisten Ionen bei der letzten Verstärkungsstufe einer solchen GEM-Auslesestruktur entstehen, lässt sich ihr Rückfluss ins Driftvolumen durch geeignete Konfiguration des GEM-Stapels über die verwendeten GEM-Spannungen und Transferfelder sehr gut unterdrücken. Schematisch ist eine GEM-Auslesestruktur in Abbildung 2.3 dargestellt, wobei sich bei einer vollständigen TPC ein Detektor mit Ortsauflösung (zum Beispiel eine Padebene) an der Stelle der Anode befinden würde.



(a)



(b)

**Abbildung 1.2:** a: Verlauf der elektrischen Feldlinien an den Löchern einer GEM [5]  
b: Aufnahme einer GEM mit einem Raster-Elektronenmikroskop [1]



---

## 2 Transferkoeffizienten

Transferkoeffizienten dienen dazu, das Verhalten der Elektronen- und Ionenströme innerhalb der GEM-Auslesestruktur zu beschreiben. Da für Ionen keine Gasverstärkung in den GEMs stattfindet, unterscheidet man zwischen Transferkoeffizienten für Elektronen und für Ionen.

Mit Hilfe der Transferkoeffizienten kann die Gesamtverstärkung und die Ionenrückdrift einer GEM-Auslesestruktur vorhergesagt werden. Für die Transferkoeffizienten existieren Parametrisierungen, welche aus dem elektrostatischen Modell [7] stammen. Diese können an gemessene Transferkoeffizienten angepasst werden. Das elektrostatische Modell simuliert den Verlauf der elektrischen Feldlinien innerhalb und außerhalb der GEMs. Es ermöglicht die Berechnung der Transferkoeffizienten unter der Annahme, dass Elektronen und Ionen exakt den elektrischen Feldlinien folgen, es vernachlässigt die Diffusion. Weiterhin wird für das elektrostatische Modell angenommen, dass Elektronen und Ionen nach der Gasverstärkung gleichmäßig innerhalb der GEM-Löcher verteilt sind. Mit Kenntnis der angepassten Parametrisierungen können Simulationen der Elektronen- und Ionenströme für gewählte elektrische Felder und Spannungen an den GEMs durchgeführt werden. Durch diese Simulationen kann eine Optimierung der Parameter der Auslesestruktur im Hinblick auf Gesamtverstärkung und minimierten Ionenrückdrift erfolgen.

### 2.1 Definition der Transferkoeffizienten

Um die folgenden Definitionen der Transferkoeffizienten zu veranschaulichen, sind die von den Transferkoeffizienten beschriebenen Vorgänge für Elektronen in Abbildung 2.1 und für Ionen in Abbildung 2.2 dargestellt.

#### 2.1.1 Sammeleffizienz für Elektronen

Die Elektronen-Sammeleffizienz ist definiert als das umgekehrte Verhältnis zwischen der Anzahl der Elektronen, welche auf die GEM zudriften und der Anzahl der Elektronen, die auch in die Löcher der GEM gezogen werden und nicht auf deren Oberfläche enden.

$$C^- = \frac{\text{Anzahl ins Loch gezogene } e^-}{\text{Anzahl ankommende } e^-} \quad (2.1)$$

#### 2.1.2 Extraktionseffizienz für Elektronen

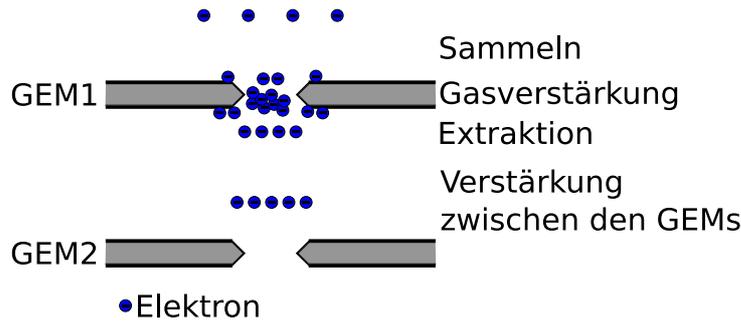
Die Elektronen-Extraktionseffizienz bezeichnet das Verhältnis aus der Anzahl der in der GEM durch Gasverstärkung, erzeugten Elektronen und der Anzahl an Elektronen, welche aus der GEM extrahiert werden. Nicht extrahierte Elektronen werden dabei auf der Anodenseite der GEM, in der sie erzeugt wurden, eingefangen.

$$X^- = \frac{\text{Anzahl aus GEM extrahierte } e^-}{\text{Anzahl im Loch produzierte } e^-} \quad (2.2)$$

#### 2.1.3 Verstärkung zwischen den GEMs

Die Verstärkung zwischen den GEMs kann eintreten, sobald die Feldstärke zwischen den GEMs oder zwischen einer GEM und der Anode ausreichend für Gasverstärkung ist. Somit ist die Verstärkung zwischen den GEMs definiert als das Verhältnis zwischen der Anzahl der bei GEM( $i + 1$ ) ankommenden und der Anzahl der bei GEM  $i$  extrahierten Elektronen.

$$G_{\text{par},i} = \frac{\text{Anzahl bei GEM}(i + 1) \text{ ankommende } e^-}{\text{Anzahl bei GEM } i \text{ extrahierte } e^-} \quad (2.3)$$



**Abbildung 2.1:** Graphische Darstellung der von den Transferkoeffizienten für Elektronen beschriebenen Vorgänge

### 2.1.4 Verstärkung in einer einzelnen GEM

Wenn die Feldstärke in den Löchern einer GEM die Schwelle für Gasverstärkung überschreitet, werden eingesammelte Elektronen in den Löchern vervielfacht. Die Verstärkung einer einzelnen GEM ergibt sich somit als die Anzahl der Elektronen im Loch nach der Gasverstärkung, normiert auf die Anzahl der von der GEM eingesammelten Elektronen.

$$G = \frac{\text{Anzahl } e^- \text{ im Loch nach der Gasverstärkung}}{\text{Anzahl ins Loch gezogene } e^-} \quad (2.4)$$

### 2.1.5 Sammeleffizienz für Ionen

Analog zur Elektronen-Sammeleffizienz ergibt sich die Ionen-Sammeleffizienz als die Anzahl der in die Löcher einer GEM gesaugten Ionen normiert auf die Anzahl der Ionen, die auf diese GEM zudriften.

$$C^+ = \frac{\text{Anzahl ins Loch gezogene Ionen}}{\text{Anzahl ankommende Ionen}} \quad (2.5)$$

### 2.1.6 Primäre Extraktionseffizienz für Ionen

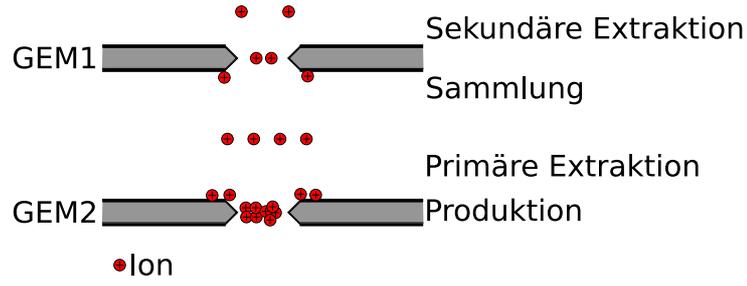
Die primäre Ionen-Extraktionseffizienz ist analog zur Extraktionseffizienz für Elektronen definiert als das umgekehrte Verhältnis aus der Anzahl der in einer GEM bei der Gasverstärkung entstandenen Ionen und der Anzahl der aus dieser GEM extrahierten Ionen.

$$X_{\text{prim}}^+ = \frac{\text{Anzahl aus GEM extrahierte Ionen}}{\text{Anzahl im Loch entstandene Ionen}} \quad (2.6)$$

### 2.1.7 Sekundäre Extraktionseffizienz für Ionen

Da für Ionen keine Gasverstärkung stattfindet, wird die sekundäre Extraktionseffizienz definiert als die Anzahl der aus einer GEM extrahierten Ionen, welche nicht in dieser GEM erzeugt wurden, normiert auf die Anzahl der Ionen, welche in die Löcher dieser GEM gezogen wurden.

$$X_{\text{sek}}^+ = \frac{\text{Anzahl aus GEM extrahierte Ionen}}{\text{Anzahl ins Loch gezogene Ionen}} \quad (2.7)$$



**Abbildung 2.2:** Graphische Darstellung der von den Transferkoeffizienten für Ionen beschriebenen Vorgänge. Dabei sind nur die in GEM2 produzierten Ionen eingezeichnet.

## 2.2 Parametrisierungen der Transferkoeffizienten

Die im Rahmen dieser Arbeit benutzten Parametrisierungen für die Transferkoeffizienten sind [4] entnommen. Ihre Herleitung beruht auf dem elektrostatischen Modell zur Beschreibung der Elektronen- und Ionenströme innerhalb einer GEM-Auslesestruktur. Im Folgenden bezeichnet die Variable  $x$  das Verhältnis zwischen dem elektrischen Feld außerhalb der GEM  $E_{\text{ext}}$  und dem elektrischen Feld innerhalb der GEM-Löcher  $E_{\text{Loch}}$ .

$$x := \frac{E_{\text{ext}}}{E_{\text{Loch}}} \quad (2.8)$$

### 2.2.1 Sammeleffizienz für Elektronen

Aus dem elektrostatischen Modell folgt die Parametrisierung für die Elektronen-Sammeleffizienz mit den freien Parametern  $r$  und  $s$ .

$$C^-(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \leq r^{1/s} \\ r \cdot x^{-s} & \text{für } x > r^{1/s} \end{cases} \quad (2.9)$$

### 2.2.2 Extraktionseffizienz für Elektronen

Aus dem elektrostatischen Modell ergibt sich als Parametrisierung für die Elektronen-Extraktionseffizienz

$$X^-(x) = \begin{cases} \frac{1}{T_{\text{opt}}} x & \text{für } x \leq r^{1/s} \\ \frac{r}{T_{\text{opt}}} x^{1-s} & \text{für } x > r^{1/s} \end{cases} \quad (2.10)$$

mit den beiden freien Parametern  $r$  und  $s$ , wobei  $T_{\text{opt}}$  die optische Transparenz der GEMs bezeichnet. Aufgrund der endlichen Entfernung der GEMs zueinander und zur Anode kommt es auch bei  $E_{\text{ext}} = 0 \text{ V/cm}$  zu einer Extraktion. Daher wurden zwei weitere freie Parameter ( $y$  und  $g$ ) als Offsets in [4] hinzugefügt, um diesen Effekt zu beschreiben. Somit wird die Elektronen-Extraktionseffizienz durch

$$X^-(x) = \begin{cases} \frac{1}{T_{\text{opt}}} (x - y) + g & \text{für } x \leq r^{1/s} \\ \frac{r}{T_{\text{opt}}} (x - y)^{1-s} + g & \text{für } x > r^{1/s} \end{cases} \quad (2.11)$$

beschrieben. Die optische Transparenz  $T_{\text{opt}}$  einer GEM ergibt sich für eine hexagonale Anordnung der Löcher aus dem Durchmesser  $d$  und dem Abstand  $p$  der Löcher zu

$$T_{\text{opt}} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left( \frac{d}{p} \right)^2 \quad (2.12)$$

### 2.2.3 Verstärkung zwischen den GEMs

Da bei der späteren Messung bzw. Berechnung der Transferkoeffizienten lediglich das Produkt  $X^- \cdot G_{\text{par}}$  bestimmt werden kann, wird die Parametrisierung der Verstärkung zwischen den GEMs als Funktion des Feldstärkenverhältnisses  $x$  geschrieben. Dies dient dazu, das Produkt aus  $X^-$  und  $G_{\text{par}}$  später an die Messdaten anpassen zu können. Eigentlich ist die Verstärkung zwischen den GEMs jedoch eine Funktion der Feldstärke  $E_{\text{ext}}$  außerhalb der GEM und damit unabhängig von der Feldstärke  $E_{\text{Loch}}$  innerhalb der GEM-Löcher. Die Verstärkung zwischen den GEMs wird wie folgt parametrisiert:

$$G_{\text{par}}(x, U_{\text{GEM}}) = \begin{cases} 1 & \text{für } x < \frac{z}{a \cdot U_{\text{GEM}}} \\ \exp(e \cdot (a \cdot U_{\text{GEM}} \cdot x - z)) & \text{für } x \geq \frac{z}{a \cdot U_{\text{GEM}}} \end{cases} \quad (2.13)$$

wobei  $a \cdot U_{\text{GEM}}$  näherungsweise das elektrische Feld innerhalb der GEM, bei Vernachlässigung des Einflusses der externen elektrischen Felder auf selbiges liefert. Das Anpassen dieser Parametrisierung erfolgt über die freien Parameter  $e$  und  $z$ .

### 2.2.4 Verstärkung in einer einzelnen GEM

Zur Beschreibung der Verstärkung einer einzelnen GEM dient eine Exponentialfunktion mit den freien Parametern  $\alpha$  und  $\beta$ . Diese Parametrisierung wird ebenfalls durch das elektrostatische Modell motiviert. Die Verstärkung einer einzelnen GEM ist eine Funktion der Feldstärke in den GEM-Löchern  $E_{\text{Loch}}$  oder der GEM-Spannung  $U_{\text{GEM}}$ .

$$G(E_{\text{Loch}}) = \beta \cdot \exp(\alpha \cdot E_{\text{Loch}}) \quad (2.14)$$

### 2.2.5 Sammeleffizienz für Ionen

Analog zur Elektronen-Sammeleffizienz ergibt sich die Parametrisierung der Ionen-Sammeleffizienz mit den freien Parametern  $r$  und  $s$ .

$$C^+(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \leq r^{1/s} \\ r \cdot x^{-s} & \text{für } x > r^{1/s} \end{cases} \quad (2.15)$$

### 2.2.6 Primäre Extraktionseffizienz für Ionen

Die Parametrisierung der primären Ionen-Extraktionseffizienz ergibt sich aus dem elektrostatischen Modell analog zur Elektronen-Extraktionseffizienz, allerdings sind hier die beiden zusätzlichen Offset-Parameter nicht notwendig.

$$X_{\text{prim}}^+(x) = \begin{cases} \frac{x}{T_{\text{opt}}} & \text{für } x \leq r^{1/s} \\ \frac{r}{T_{\text{opt}}} \cdot x^{1-s} & \text{für } x > r^{1/s} \end{cases} \quad (2.16)$$

### 2.2.7 Sekundäre Extraktionseffizienz für Ionen

Für die sekundäre Ionen-Extraktionseffizienz sagt das elektrostatische Modell folgende Parametrisierung vorher:

$$X_{\text{sek}}^+ \left( \frac{X_{\text{prim,oben}}^+}{X_{\text{prim,unten}}^+} \right) = \begin{cases} \frac{X_{\text{prim,oben}}^+}{X_{\text{prim,unten}}^+} & \text{für } X_{\text{prim,oben}}^+ < X_{\text{prim,unten}}^+ \\ 1 & \text{für } X_{\text{prim,oben}}^+ > X_{\text{prim,unten}}^+ \end{cases} \quad (2.17)$$

wobei  $X_{\text{prim,oben}}^+$  und  $X_{\text{prim,unten}}^+$  jeweils Funktionen der entsprechenden Feldstärkenverhältnisse  $x_{\text{oben}}$  und  $x_{\text{unten}}$  sind. In [4] wurde an diese Parametrisierung zusätzlich eine Funktion zur Glättung des Übergangs multipliziert.

## 2.3 Berechnung aus messbaren Größen

Um die Transferkoeffizienten zu erhalten, können die Ströme an Anode, Kathode und an den Anschlüssen der GEMs einer GEM-Auslesestruktur gemessen werden. Da sich die so messbaren Ströme nicht in Elektronen- und Ionenströme separieren lassen, müssen entsprechende Beziehungen zwischen den gemessenen Strömen und den gesuchten Elektronen- bzw. Ionenströmen genutzt werden. Zum Teil müssen dazu auch Näherungen eingegangen oder Referenzmessungen gemacht werden.

Die im Folgenden aufgelisteten Berechnungen für die einzelnen Transferkoeffizienten stammen aus [4]. Die Benennung der gemessenen Ströme, der Spannungen und elektrischen Felder ist in Abbildung 2.3 illustriert.

### 2.3.1 Sammeleffizienz für Elektronen

Ausgehend von der Annahme, dass bei Änderung des Driftfeldes  $E_D$  der Anodenstrom  $I_A$  dann maximal wird, wenn die Sammeleffizienz ihren Maximalwert von eins erreicht, kann die Elektronen-Sammeleffizienz relativ berechnet werden. Dabei wird der Einfluss des veränderten Driftfeldes durch Normierung der Anodenströme auf die Verstärkung  $G$  von GEM1 eliminiert. Der Einfluss des Driftfeldes besteht darin, dass dieses das elektrische Feld  $E_{\text{Loch}}$  in GEM1 beeinflusst und somit die Verstärkung von GEM1 verändert.

$$C_{\text{rel,GEM1}}^- = \frac{I_A/G(E_D)}{I_{A,\text{max}}/G(E_{D,I_A=\text{max}})} \quad (2.18)$$

Da sich durch die Veränderung des Driftfeldes  $E_D$  lediglich das Feld in den Löchern der ersten GEM leicht ändert, ergibt sich mit der Parametrisierung der Verstärkung einer einzelnen GEM

$$\frac{G(E_D)}{G(E_{D,I_A=\text{max}})} = \exp(b\beta \cdot (E_D - E_{D,I_A=\text{max}})) \quad (2.19)$$

### 2.3.2 Extraktionseffizienz für Elektronen und Verstärkung zwischen den GEMs

$$X_{\text{GEM3}}^- \cdot G_{\text{par}} = \frac{I_A}{I_A + I_{\text{GEM3A}}} \quad (2.20)$$

Bei Vernachlässigung der Verstärkung zwischen den GEMs  $G_{\text{par}}$  ergibt die Summe der Ströme  $I_A$  und  $I_{\text{GEM3A}}$  die in GEM3 erzeugten Elektronen, da zwischen Anode und GEM3 keine Ionen entstehen bzw. auftreten. Der Anodenstrom  $I_A$  besteht somit nur aus den aus GEM3 extrahierten Elektronen. Die ab einer bestimmten Feldstärke  $E_I$  zwischen Anode und GEM auftretende zusätzliche Gasverstärkung  $G_{\text{par}}$  kann allerdings nicht von der Elektronen-Extraktionseffizienz unterschieden werden, somit muss hier das Produkt der zugehörigen Parametrisierungen an die Messdaten angepasst werden.

### 2.3.3 Verstärkung in einer einzelnen GEM

$$G_{\text{GEM3}} = \frac{I_A + I_{\text{GEM3A}}}{I_{\text{GEM3K},U_{\text{GEM3}}=0}} \quad (2.21)$$

Zunächst wird die Spannung  $U_{\text{GEM3}}$  auf 0 V gesetzt, somit können alle bei GEM3 ankommenden Elektronen gemessen werden ( $I_{\text{GEM3K},U_{\text{GEM3}}=0}$ ). Im nächsten Schritt wird  $U_{\text{GEM3}}$  soweit erhöht, dass alle ankommenden Elektronen an GEM3 in die Löcher gezogen werden, womit  $I_A + I_{\text{GEM3A}}$  die Summe der in GEM3 erzeugten Elektronen und der primären, von GEM3 eingesammelten, Elektronen ergibt.

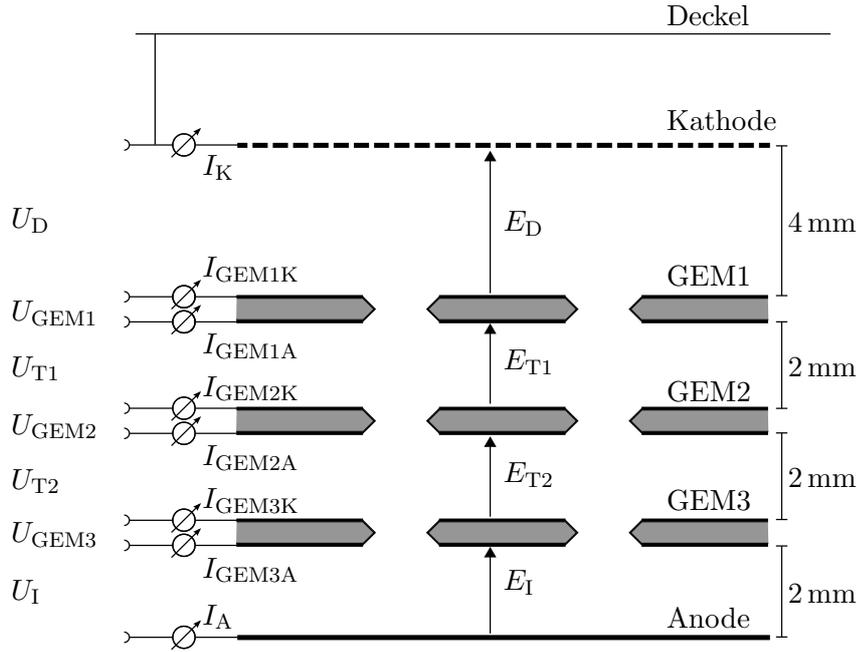


Abbildung 2.3: Nomenklatur der gemessenen Ströme, der Spannungen und elektrischen Felder

### 2.3.4 Sammeleffizienz für Ionen

$$C_{GEM2}^+ = 1 - \frac{I_{GEM2A} - I_{GEM2A}^0}{-(I_{GEM3A} + I_A) - I_{GEM3K}} \quad (2.22)$$

Der Nenner  $-(I_{GEM3A} + I_A) - I_{GEM3K}$  ergibt die aus GEM3 extrahierten Ionen, bei Vernachlässigung der bei GEM3 nicht eingesammelten Elektronen. Daher wird die Messung bei elektrischen Feldern und Spannungen durchgeführt, für die  $C_{GEM3}^- \approx 1$  gilt.  $I_{GEM2A}$  besteht aus den bei GEM2 nicht extrahierten Elektronen und den bei GEM2 nicht eingesammelten Ionen. Die Referenzmessung  $I_{GEM2A}^0$  bei ausgeschalteter GEM3 ergibt somit nur die bei GEM2 nicht extrahierten Elektronen.

### 2.3.5 Primäre Extraktionseffizienz für Ionen

$$X_{\text{prim,GEM3}}^+ = \frac{-(I_{GEM3A} + I_A) - I_{GEM3K}}{-(I_{GEM3A} + I_A)} \quad (2.23)$$

Die Anzahl der in GEM3 erzeugten Ionen ergibt sich als  $-(I_{GEM3A} + I_A)$ . Der Strom  $I_{GEM3K}$  besteht aus den bei GEM3 nicht extrahierten Ionen und den bei GEM3 nicht eingesammelten Elektronen. Da die Messungen bei elektrischen Feldstärken und Spannungen durchgeführt werden, bei denen  $C_{GEM3}^- \approx 1$  gilt, kann der Elektronen-Anteil von  $I_{GEM3K}$  vernachlässigt werden. Dieser Anteil besteht aus den bei GEM3 nicht eingesammelten Elektronen.

### 2.3.6 Sekundäre Extraktionseffizienz für Ionen

$$X_{\text{sek,GEM1}}^+ = \frac{I_K}{I_K + I_{GEM1K}} \quad (2.24)$$

Die aus GEM1 extrahierten Ionen bilden bei Vernachlässigung der in GEM1 erzeugten Ionen sowie der im Driftvolumen durch Ionisation entstandenen Ionen den Kathodenstrom  $I_K$ . Die Summe aus dem Kathodenstrom  $I_K$  und dem Strom  $I_{GEM1K}$  ergibt alle in die Löcher von

GEM1 eingesammelten Ionen. Dazu werden die in GEM1 nicht eingesammelten Elektronen vernachlässigt. Um diese Näherungen zu ermöglichen, müssen die Messungen so durchgeführt werden, dass die Elektronen-Sammeleffizienz von GEM1 während der Messungen möglichst groß ist und nicht zu weit abfällt. Um die in GEM1 erzeugten Ionen vernachlässigen zu können, muss die Ionen-Sammeleffizienz von GEM1 in der Nähe von eins liegen. Weiterhin ist eine hohe Verstärkung in GEM2, sowie eine möglichst hohe primäre Ionen-Extraktionseffizienz bei GEM2 erforderlich.



### 3 Aufbau des Messstandes

Im Wesentlichen wurde für die Messung der Ströme der gleiche Aufbau wie in [4] mit einigen Modifikationen verwendet. Die verwendete Strommesskammer besteht aus einem Rahmen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK), die nach unten mit einer durchgehenden Trägerplatte abgeschlossen ist, auf der die Anodenfläche aufgebracht ist. Nach oben ist der Rahmen mit einer Mylar-Folie abgeschlossen. Auf dem Rahmen ist eine Aluminium-Platte befestigt, in der sich ein Loch befindet. Innerhalb des Rahmens befindet sich ein Stapel aus 3 GEMs und die Kathode. Der Aufbau der Strommesskammer ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

#### 3.1 Strommesskammer

Die Strommesskammer enthält die Auslesestruktur mit drei GEMs, wobei der Abstand zwischen den GEMs und zwischen GEM und Anode jeweils 2 mm beträgt. Die Driftdistanz in der Kammer, der Abstand zur Kathode, beträgt 4 mm. Die Kontakte der GEMs und von Anode und Kathode sind als Hochspannungsstecker nach außen geführt. Das Volumen, das den GEM-Stapel umgibt, ist nach oben mit einer Mylar-Folie abgeschlossen. Direkt unter dieser befindet sich eine metallisierte Mylar-Folie, die auf dem gleichen Spannungspotenzial liegt wie die Kathode, welche ebenfalls aus metallisierter Mylar-Folie besteht. Die Kammer wird während des Betriebs ständig mit dem verwendeten Gasgemisch gespült. Mittels des Staudrucks durch einen längeren Schlauch am Gasausgang der Kammer wird ein leichter Überdruck in der Kammer erzeugt. Die zum Betrieb der Strommesskammer notwendigen Hochspannungen werden von einem an der RWTH Aachen entwickelten Floating-High-Voltage-Netzgerät (FLOH) bereitgestellt.

Um Ströme in der Kammer messen zu können, müssen zwischen Kathode und GEM1 Elektronen erzeugt werden, die dann in dem GEM-Stapel vervielfacht werden. Dazu dient eine radioaktive  $^{55}\text{Fe}$ -Quelle, deren niederenergetische Photonen durch die dünnen Mylar-Folien hindurchgelangen und so in der Kammer Gasatome bzw. -moleküle ionisieren können. Die verwendete Quelle besaß eine Aktivität von ungefähr 50 MBq, was zu nur relativ kleinen Strömen ( $< 50 \text{ nA}$ ) führte.

Um die Leckströme der GEMs und der gesamten Strommesskammer herauskalibrieren zu können, befindet sich zwischen  $^{55}\text{Fe}$ -Quelle und der Kammer ein Schieber aus 1 mm dicken Aluminium, welcher die Quelle zur Kammer hin vollständig abschirmen kann. Der Schieber wird über einen Bowdenzug von einem kleinen Servo betätigt, der über den Computer gesteuert wird. Um die geringe Aktivität der radioaktiven Quelle so gut wie möglich nutzen zu können, wurde der Original-Schieber durch einen mit größerem Loch ausgetauscht.

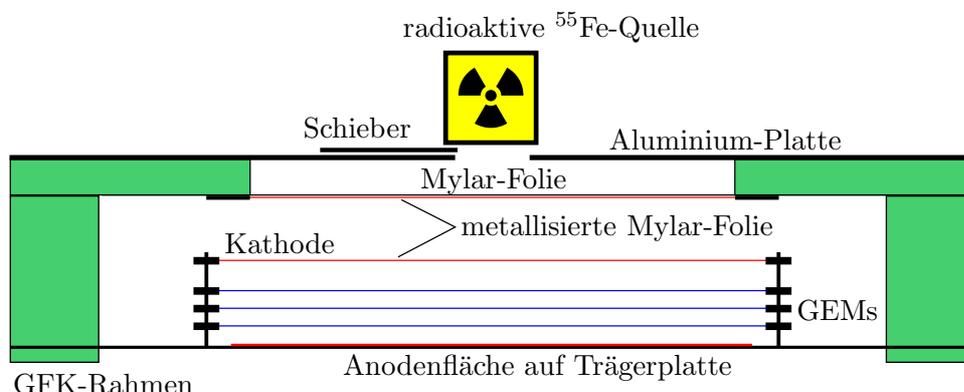


Abbildung 3.1: Aufbau der Strommesskammer

#### 3.2 Messung der Ströme

Die Ströme, die von dem Hochspannungsnetzteil zu den Anschlüssen der Strommesskammer fließen, werden mittels hochempfindlicher Strommonitore, CUMOs [2], gemessen. Über einen als PCI-Karte ausgeführten ADC der Firma Meilhaus werden die von den CUMOs ausgegebenen Signale für Messbereich und gemessenen Strom ausgelesen. Die CUMOs messen, so wie sie bei diesem Aufbau angeschlossen sind, die Ströme vom Hochspannungsnetzteil zu den entsprechenden Kontakten der Strommesskammer. Daher resultiert ein reiner Elektronenstrom auf einem der Kontakte in einem gemessenen Strom mit positivem Vorzeichen. Entsprechend resultiert ein reiner Ionenstrom in einem gemessenen Strom mit negativem Vorzeichen.

#### 3.3 Software zur Steuerung der Messungen

Zum Auslesen der CUMOs und zum Ansteuern des Hochspannungsnetzteils kam die Steuerungssoftware `xtc` zum Einsatz, welche bereits für die Messungen in [4] programmiert und genutzt wurde. Um das hier verwendete Hochspannungsnetzteil FLOH ansteuern und die von den CUMOs gemessenen Ströme über den Meilhaus-ADC auslesen zu können, wurde die Software angepasst. Das Programm bestimmt die Ströme, indem es für jeden Messpunkt die Ströme mehrfach in einem einstellbaren Zeitintervall misst und anschließend mittelt, wobei die Standardabweichung dieser Messungen als Messfehler ausgegeben wird. Es ist möglich die Messungen über Skripte zu steuern.

Bei ersten Messungen schwankten die Ströme sehr stark. Messungen über Nacht, bei konstanten Spannungen, offenbarten große Störungen auf den Strömen, wobei die Messpunkte mit den stärksten Abweichungen vom Mittelwert sehr geringe Fehler aufwiesen. Die wahrscheinlichste Ursache dafür ist, dass zeitweise die Messungen phasensynchron zu dem Rauschen auf den Strömen liefen. Ein Teil des Rauschens stammte von einem 50 Hz-Brummen, welches auf den Ausgangssignalen der CUMOs zu beobachten war. Dieses 50 Hz-Brummen wurde nur bei der Kombination von FLOH mit den CUMOs beobachtet, bei einem CAEN SY-127 Hochspannungsnetzteil trat dieses Problem nicht auf. Die weiteren Ursachen für das vornehmlich niederfrequente Rauschen konnten nicht identifiziert werden. Um die Auswirkungen des Rauschens auf die Messungen zu minimieren, wurde der Messablauf des Programms `xtc` dahingehend angepasst, dass die Abstände zwischen den Samples zufällig in einem einstellbaren Zeitintervall generiert werden, womit zum Rauschen phasensynchrone Messungen verhindert werden.

---

## 4 Messung der Transferkoeffizienten

Für die Messung der Ströme zur Berechnung der Transferkoeffizienten wurden Messskripte verwendet, welche vom Programm `xtc` gelesen und ausgeführt wurden. Vor jedem Messpunkt erfolgte eine Nullkalibration der Stöme bei geschlossenem Schieber. Jeder Messpunkt wurde über 100 Messungen gemittelt, wobei die Abstände zwischen den 100 Messungen jedesmal zufällig zwischen 0 und 20 ms betragen. Die genutzten Messskripte wurden mit dem selbstgeschriebenen C++-Programm `makescript` erzeugt. Die Messungen wurden ohne Magnetfeld durchgeführt. Während der Messreihen betrug die Temperatur des Gases ungefähr 22 bis 23 °C. Das Spülen der Strommesskammer erfolgte bei einem Gasfluss von etwa 2,5 l/h.

Das Aussortieren von Messpunkten mit geschlossenem Schieber sowie die Berechnung der Transferkoeffizienten aus den gemessenen Strömen erfolgte über das selbstgeschriebene Shellskript `process_tc`. Das Anpassen der Parametrisierungen an die gewonnenen Transferkoeffizienten wurde mit dem Programm `gnuplot` durchgeführt.

### 4.1 Messungen mit TDR-Gas

Zur Überprüfung des Messstandes wurden die Transferkoeffizienten für die bereits parametrisierte Gasmischung Ar:CO<sub>2</sub>:CH<sub>4</sub> 93:2:5 (TDR), wie im Technical Design Report des TESLA-Projekts [8] vorgeschlagen, erneut bestimmt und mit den Aachener Messungen [4] verglichen.

Zum Zeitpunkt dieser Kontrollmessung stand nur der Original-Schieber mit kleinerer Öffnung zur Verfügung, weshalb aufgrund der geringeren Ströme das Signal-zu-Rauschen-Verhältnis für diese Messungen schlechter war, als für spätere Messungen.

Um die Vergleichbarkeit mit den Aachener Messungen zu gewährleisten, wurden die gleichen Spannungen und elektrischen Feldstärken verwendet. Diese sind in Tabelle B.1 aufgelistet. In den Abbildungen 4.1 bis 4.6 sind die gemessenen Transferkoeffizienten zusammen mit den angepassten sowie den in Aachen gefundenen Parametrisierungen dargestellt.

Die bestimmten Transferkoeffizienten zeigten zwar den aus den Aachener Messungen erwarteten Verlauf sowie auch die in Aachen beobachteten Abweichungen von den theoretischen Vorhersagen, die in [4] bestimmten Parameter der Parametrisierungen ließen sich jedoch nicht innerhalb der Fehlergrenzen reproduzieren. Wahrscheinliche Ursachen hierfür sind Unterschiede in Temperatur und Gasdruck innerhalb der Strommesskammer während der Messungen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass die von `gnuplot` ausgegebenen Fehler für die Parameter systematisch zu klein sind. Ein Indiz dafür ist, dass die ausgegebenen Fehler extrem klein sind, teilweise im Prozentbereich. Um eine bessere Fehlerabschätzung für die ermittelten Parameter zu erhalten, wurden der fehlergewichtete Mittelwert und die fehlergewichtete Standardabweichung bestimmt.

Die durch drei Messreihen bestimmten Parameter sind in Tabelle 4.1 zusammen mit den in Aachen gefundenen Parametern gelistet. Tabelle 4.2 enthält die Mittelwerte der ermittelten Parameter und zum Vergleich die in Aachen gefundenen Parameter. Zur Berechnung der Mittelwerte wurden die Einzelwerte mit ihrem Fehler gewichtet. Als Fehler für die Mittelwerte wurde die Standardabweichung berechnet. Dies ermöglicht eine bessere Abschätzung der Unsicherheiten der gefundenen Parameter, da die von `gnuplot` bei der Anpassung ausgegebenen Fehler zum Teil zu gering erscheinen.

Der bei diesen Messungen verwendete Gasdruck innerhalb der Strommesskammer ist unbekannt, da weder eine Konstantdruckregelung noch eine Möglichkeit zum Messen und Auslesen des Gasdrucks vorhanden war. Aufgrund der Erzeugung des Überdrucks in der Strommesskammer über den Staudruck eines langen Schlauchstücks mit offenem Ende, war der Gasdruck in der Kammer luftdruckabhängig und schwankte somit während der Messungen.

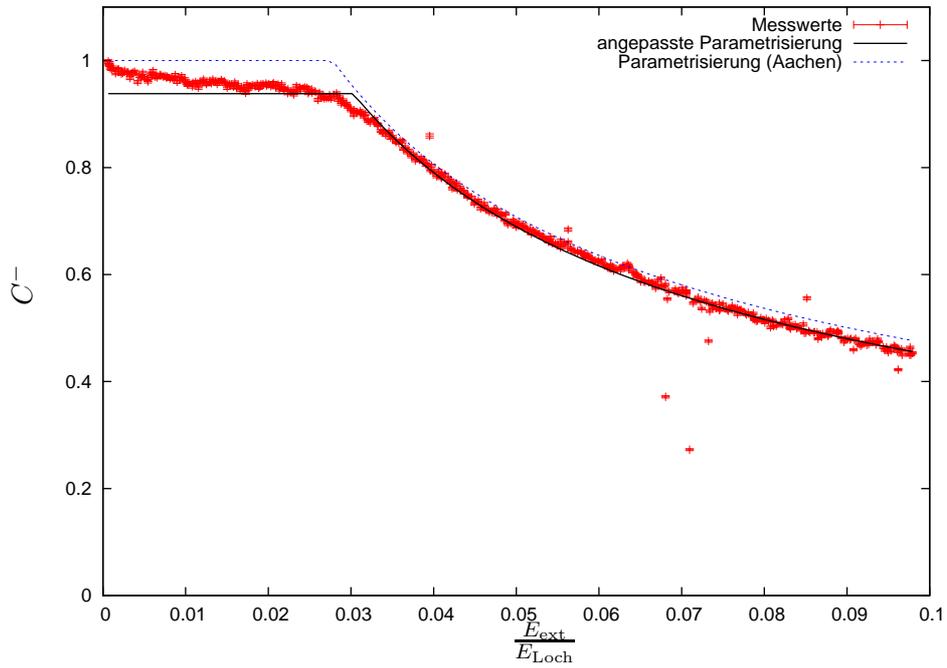


Abbildung 4.1: Sammeleffizienz für Elektronen für TDR-Gas, angepasste Parametrisierung und Aachener Parametrisierung

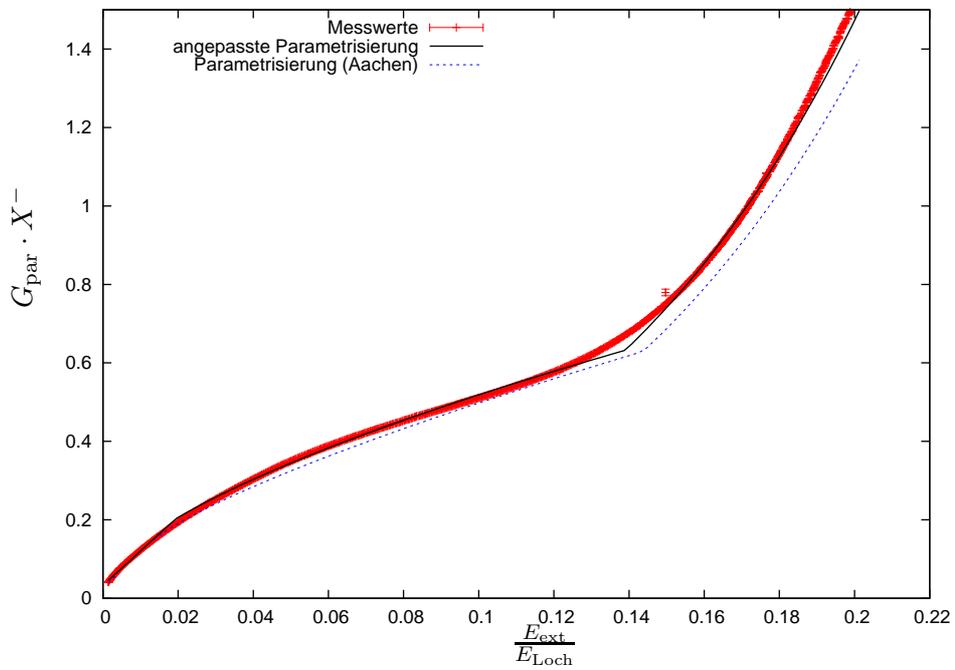
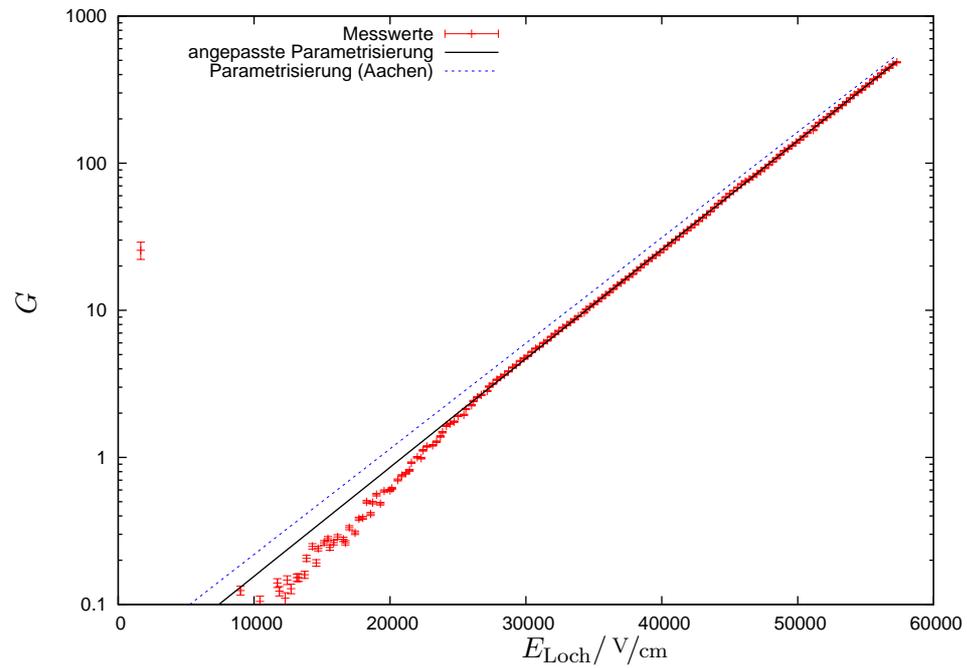
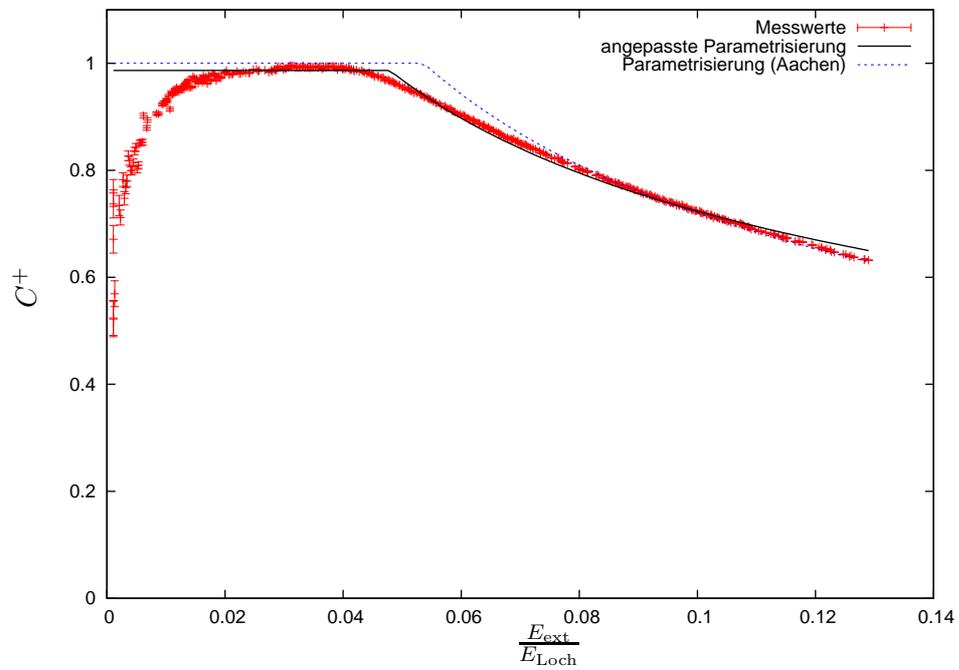


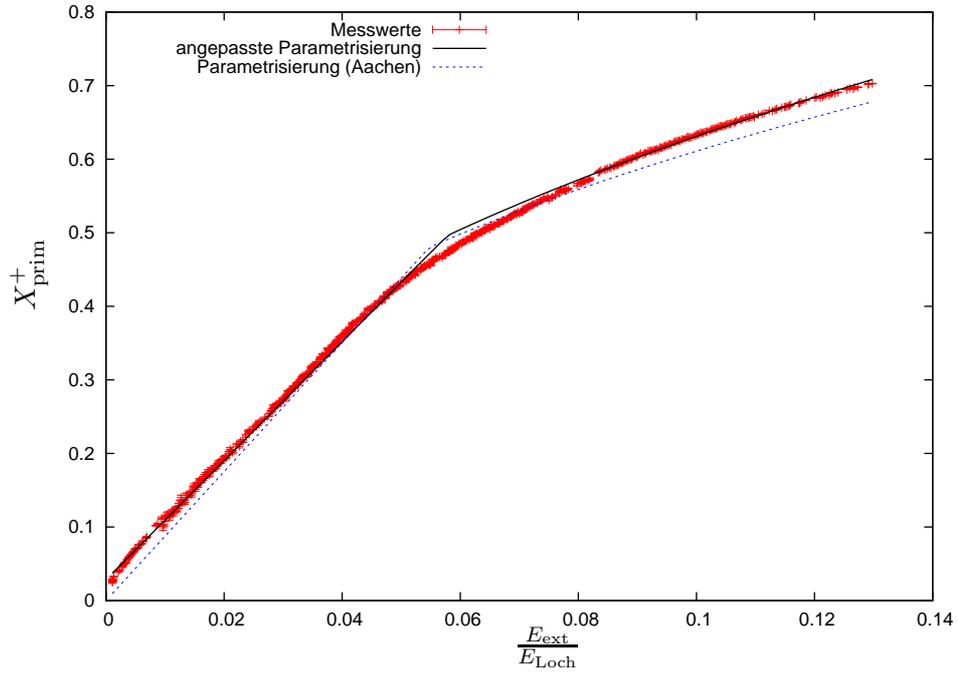
Abbildung 4.2: Produkt aus Extraktionseffizienz und Verstärkung zwischen den GEMs für Elektronen für TDR-Gas, angepasste Parametrisierung und Aachener Parametrisierung



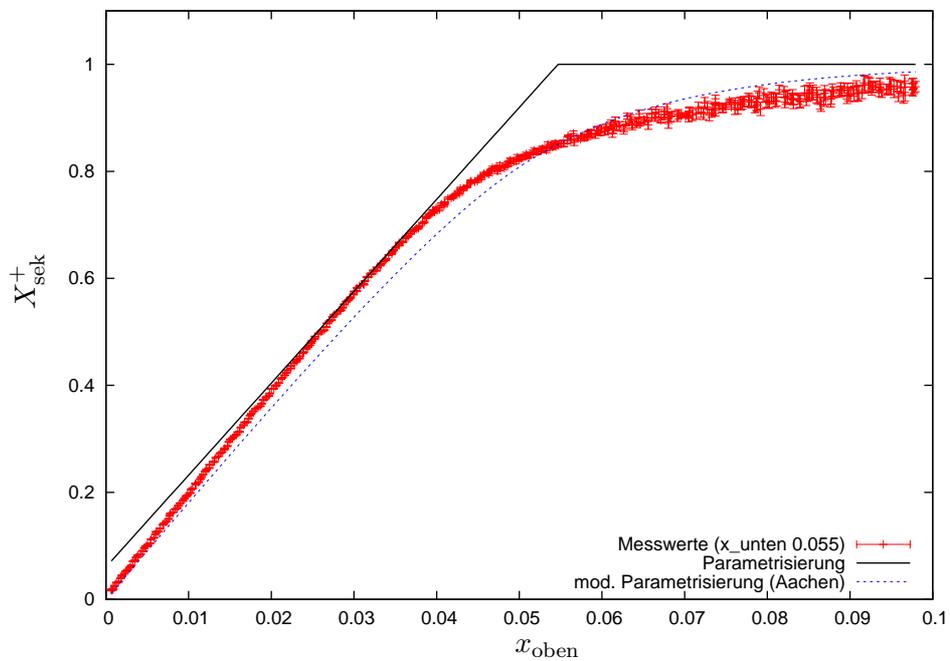
**Abbildung 4.3:** Verstärkung einer einzelnen GEM für TDR-Gas, angepasste Parametrisierung und Aachener Parametrisierung



**Abbildung 4.4:** Sammeleffizienz für Ionen für TDR-Gas, angepasste Parametrisierung und Aachener Parametrisierung



**Abbildung 4.5:** Primäre Extraktionseffizienz für Ionen für TDR-Gas, angepasste Parametrisierung und Aachener Parametrisierung



**Abbildung 4.6:** Sekundäre Extraktionseffizienz für Ionen für TDR-Gas, berechnete Parametrisierung und Aachener Parametrisierung. Das Feldstärkenverhältnis auf der anderen GEM-Seite  $x_{\text{unten}}$  beträgt 0,05.

Parameter		Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3	Aachen
$C^-$	$r$	$0,107 \pm 0,001$	$0,116 \pm 0,003$	$0,106 \pm 0,001$	0,1215
	$s$	$0,663 \pm 0,004$	$0,615 \pm 0,008$	$0,653 \pm 0,003$	0,5882
	$\kappa$	$0,985 \pm 0,002$	$0,938 \pm 0,005$	$0,979 \pm 0,001$	
$X^-$	$r$	$0,256 \pm 0,001$	$0,242 \pm 0,001$	$0,236 \pm 0,001$	0,2660
	$s$	$0,336 \pm 0,003$	$0,360 \pm 0,002$	$0,367 \pm 0,002$	0,2398
	$g$	$0,0334 \pm 0,0012$	$0,0329 \pm 0,0009$	$0,0336 \pm 0,0008$	0,1288
	$y$				0,01159
$G_{\text{par}}$	$e/\text{cm/V}$	$(227 \pm 2) \cdot 10^{-6}$	$(231 \pm 1) \cdot 10^{-6}$	$(234 \pm 1) \cdot 10^{-6}$	0,002179
	$z/\text{V/cm}$	$6175 \pm 13$	$6156 \pm 10$	$6070 \pm 9$	6367
$G$	$\alpha/\text{cm/V}$	$(1699 \pm 1) \cdot 10^{-7}$	$(1704 \pm 2) \cdot 10^{-7}$	$(1705 \pm 1) \cdot 10^{-7}$	0,0001653
	$\beta$	$0,0281 \pm 0,0002$	$0,0283 \pm 0,0002$	$0,0291 \pm 0,0002$	0,04192
$C^+$	$r$	$0,282 \pm 0,002$	$0,278 \pm 0,002$	$0,276 \pm 0,002$	0,2134
	$s$	$0,420 \pm 0,002$	$0,421 \pm 0,002$	$0,423 \pm 0,002$	0,5279
	$\kappa$	$0,987 \pm 0,001$	$0,987 \pm 0,001$	$0,990 \pm 0,001$	
$X_{\text{prim}}^+$	$r$	$0,218 \pm 0,001$	$0,216 \pm 0,001$	$0,225 \pm 0,002$	0,1751
	$s$	$0,524 \pm 0,002$	$0,537 \pm 0,002$	$0,530 \pm 0,003$	0,6000
	$g$	$0,0297 \pm 0,0006$	$0,0284 \pm 0,0007$	$0,0286 \pm 0,0008$	

**Tabelle 4.1:** In drei Messreihen ermittelte Parameter und Aachener Parameter für die TDR-Gasmischung

Parameter		Mittelwerte	Aachen
$C^-$	$r$	$0,107 \pm 0,003$	0,1215
	$s$	$0,653 \pm 0,012$	0,5882
	$\kappa$	$0,978 \pm 0,011$	
$X^-$	$r$	$0,243 \pm 0,008$	0,2660
	$s$	$0,358 \pm 0,012$	0,2398
	$g$	$0,0333 \pm 0,0003$	0,1288
	$y$		0,01159
$G_{\text{par}}$	$e/\text{cm/V}$	$(232 \pm 2) \cdot 10^{-6}$	0,002179
	$z/\text{V/cm}$	$6122 \pm 47$	6367
$G$	$\alpha/\text{cm/V}$	$(1703 \pm 2) \cdot 10^{-7}$	0,0001653
	$\beta$	$0,0285 \pm 0,0004$	0,04192
$C^+$	$r$	$0,279 \pm 0,002$	0,2134
	$s$	$0,421 \pm 0,001$	0,5279
	$\kappa$	$0,988 \pm 0,002$	
$X_{\text{prim}}^+$	$r$	$0,219 \pm 0,003$	0,1751
	$s$	$0,530 \pm 0,006$	0,6000
	$g$	$0,0291 \pm 0,0006$	

**Tabelle 4.2:** Mittelwerte der gefundenen Parameter und Aachener Parameter für die TDR-Gasmischung

Eine Änderung des Drucks während der Messungen zur Bestimmung der Elektronen-Sammeleffizienz kann, da diese relativ berechnet wird, dazu führen, dass die Elektronen-Sammeleffizienz falsch normiert wird und somit ihr Maximalwert von eins abweicht. Um dies zu kompensieren wurde die Parametrisierung mit einem zusätzlichen freien Parameter  $\kappa$  angepasst, der eine eventuell falsche Normierung ausgleichen kann. Somit ist die hier angepasste Parametrisierung durch

$$C^-(x) = \begin{cases} \kappa & \text{für } x \leq r^{1/s} \\ \kappa r \cdot x^{-s} & \text{für } x > r^{1/s} \end{cases} \quad (4.1)$$

gegeben. Dabei dient der Parameter  $\kappa$  lediglich zur Kompensation einer fehlerhaften Normierung, somit entspricht eine Sammeleffizienz mit dem Wert  $\kappa$  eigentlich einer Sammeleffizienz von eins.

Das leicht ansteigende Plateau der Elektronen-Sammeleffizienz in Abbildung 4.1 könnte als Ursache einen Abfall des Kammerdrucks während der Messungen haben. Diese Vermutung wird dadurch gestützt, dass bei einer späteren Messung der Elektronen-Sammeleffizienz das Plateau nicht mehr abfiel, sondern leicht anstieg. Bei den Aachener Messungen, für die eine Konstantdruckregelung verwendet wurde, war ein solches Verhalten nicht erkennbar.

Da eine Druckveränderung zwischen Messung und Referenzmessung eine ähnliche Auswirkung auf die Normierung der Ionen-Sammeleffizienz haben kann, wurde für diese ebenfalls die Parametrisierung um den freien Parameter  $\kappa$  ergänzt, der auch hier nur zur Kompensation einer falschen Normierung dient.

$$C^+(x) = \begin{cases} \kappa & \text{für } x \leq r^{1/s} \\ \kappa r \cdot x^{-s} & \text{für } x > r^{1/s} \end{cases} \quad (4.2)$$

Um zu verhindern, dass der von der Parametrisierung nicht beschriebene Abfall der Ionen-Sammeleffizienz für kleine Feldstärkenverhältnisse das Anpassen der Parametrisierung beeinflusst, wurde die Parametrisierung nur für  $x > 0,02$  angepasst. Der Abfall der Ionen-Sammeleffizienz für geringe Feldstärkenverhältnisse könnte als Ursache haben, dass für geringe Feldstärkenverhältnisse die Elektronen-Sammeleffizienz für GEM3 sinkt. Dadurch würde sich die Qualität der bei der Berechnung der Ionen-Sammeleffizienz gemachten Näherungen verschlechtern. Möglicherweise ist dies auch der Grund für die Abweichung zwischen der Parametrisierung und den Messdaten für hohe Feldstärkenverhältnisse.

Bei der Verstärkung einer einzelnen GEM (Abbildung 4.3) ergibt sich für niedrige Feldstärken in den GEM-Löchern eine Abweichung von der Parametrisierung, ein Vergleich mit [4] war diesbezüglich nicht möglich, da der entsprechende Bereich niedriger Feldstärken dort nicht dargestellt war.

Der freie Parameter  $y$  in der Parametrisierung der Elektronen-Extraktionseffizienz (Gleichung (2.10)) führte bei den hier durchgeführten Messungen beim Anpassen der Parametrisierung zu Bereichen, in denen die Parametrisierung nicht definiert war. Aus diesem Grund wurde hier der Parameter  $y$  weggelassen. Dieser diente der Verschiebung der Parametrisierung entlang der  $x$ -Achse. Bei der Parametrisierung der primären Ionen-Extraktionseffizienz wurde um die Messdaten besser beschreiben zu können, wie bei der Elektronen-Extraktionseffizienz, ein freier Parameter  $g$  addiert.

$$X_{\text{prim}}^+(x) = \begin{cases} \frac{x}{T_{\text{opt}}} + g & \text{für } x \leq r^{1/s} \\ \frac{r}{T_{\text{opt}}} \cdot x^{1-s} + g & \text{für } x > r^{1/s} \end{cases} \quad (4.3)$$

Bei der sekundären Ionen-Extraktionseffizienz wurde in den Aachener Messungen die Parametrisierung mit einer weiteren Funktion multipliziert, um den Verlauf der Parametrisierung

zu glätten und besser an die Messdaten anzupassen. Bei den hier vorliegenden Messdaten gelang es nicht, die geglättete Parametrisierung in einer vernünftigen Weise an die Messdaten anzupassen. Auch Versuche mit anderen Funktionen zur besseren Anpassung lieferten keine verwertbaren Ergebnisse. Daher wurde in Abbildung 4.6 lediglich die von dem elektrostatischen Modell vorhergesagte Parametrisierung der sekundären Ionen-Extraktionseffizienz eingezeichnet. Wie auch bei den Aachener Messungen ist der tatsächliche, gemessene Verlauf dieses Transferkoeffizienten deutlich glatter als die Parametrisierung. Eine Ursache für die Abweichung der Messdaten von der Parametrisierung ist wahrscheinlich, dass zur Berechnung der sekundären Ionen-Extraktionseffizienz viele und zum Teil große Näherungen genutzt werden.

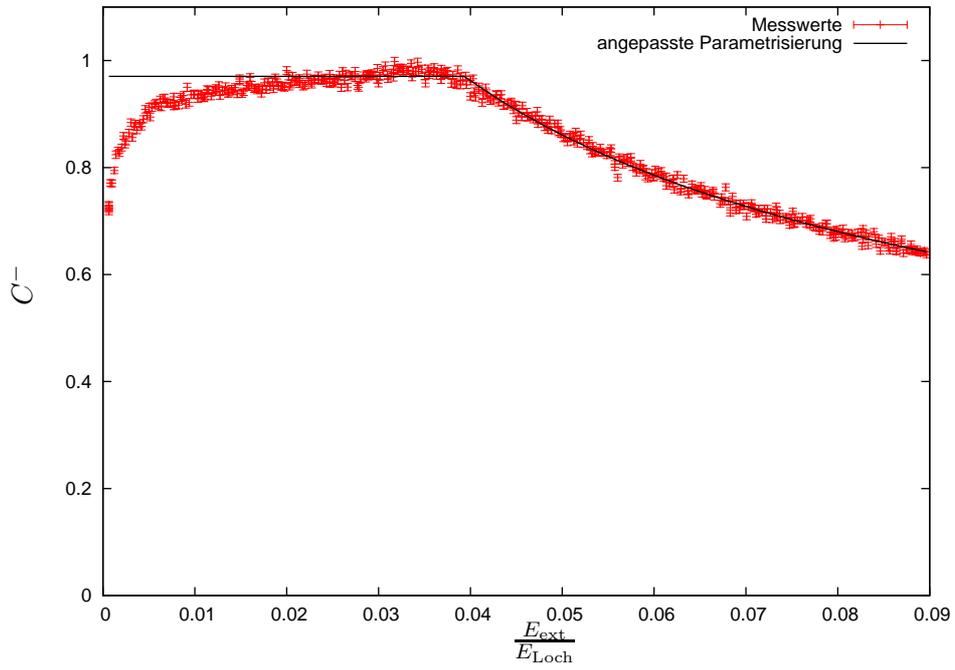
## 4.2 Transferkoeffizienten für Ar:CO<sub>2</sub> 70:30

Zur Bestimmung der Transferkoeffizienten für die Gasmischung aus 70% Argon und 30% Kohlenstoffdioxid wurden insgesamt fünf Messreihen mit identischen Saphir- und Feldkonfigurationen (siehe Tabelle B.2) durchgeführt. Für jede Messreihe wurden die Transferkoeffizienten bestimmt und parametrisiert. In den Tabellen 4.3 und 4.4 sind die jeweils gefundenen Parameter sowie der zugehörige Mittelwert aufgelistet. Zur Berechnung der Mittelwerte wurden die Einzelwerte jeweils mit ihrem Fehler gewichtet. Als Fehler wurde die fehlergewichtete Standardabweichung berechnet. Es wurden die gleichen Parametrisierungen wie zuvor für die Parametrisierung der TDR-Gasmischung verwendet. Auch bei diesen Messreihen zeigten sich wieder die bereits bei den TDR-Messungen beobachteten Abweichungen der Messdaten von den Parametrisierungen. Auch für die Gasmischung Ar:CO<sub>2</sub> ließen sich die Parameter zum Teil nicht innerhalb der Fehlergrenzen reproduzieren, wahrscheinliche Ursache ist hier ebenfalls die fehlende Konstantdruckregelung.

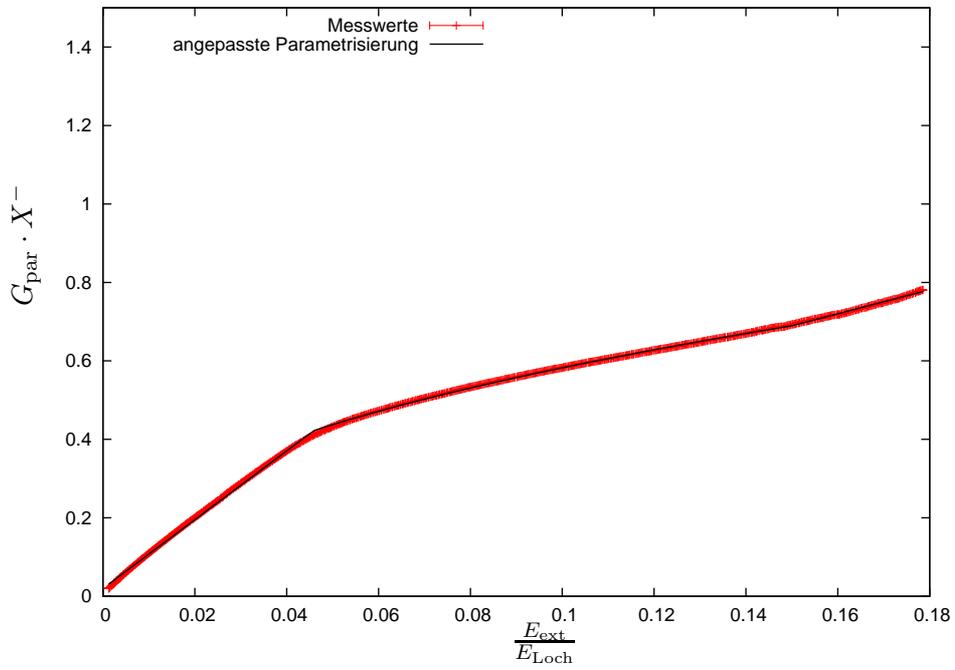
Die Ergebnisse einer der Messreihen sind graphisch in den Abbildungen 4.7 bis 4.12 dargestellt. Die zwei erkennbaren Sprünge in den Messdaten der primären Ionen-Extraktionseffizienz (Abbildung 4.11) besitzen als Ursache wahrscheinlich einen Drift einer oder mehrerer der Ausgangsspannungen des FLOH. Die zwei Knicke in der Parametrisierung der sekundären Ionen-Extraktionseffizienz (Abbildung 4.12) kommen daher, dass die Parametrisierung selbst einen Knick aufweist und ebenfalls die in ihr enthaltene primäre Ionen-Extraktionseffizienz einen Knick aufweist. Die Parametrisierung der sekundären Ionen-Extraktionseffizienz weicht für Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 für niedrige Feldstärkenverhältnisse extrem stark von den Messdaten ab. Ursache dafür ist, dass sich die Parametrisierung der sekundären Extraktionseffizienz aus der Parametrisierung der primären Extraktionseffizienz ergibt. Diese beschreibt die Messdaten für niedrige Feldstärkenverhältnisse schlecht (siehe Abbildung 4.11), der lineare Ansatz der Parametrisierung für niedrige Feldstärkenverhältnisse ist hier entweder falsch oder die Messdaten wurden durch Druckveränderungen während der Messreihe verfälscht.

Um zu verhindern, dass der Abfall der Elektronen- und Ionen-Sammeleffizienz für niedrige Feldstärkenverhältnisse die angepassten Parametrisierungen nach unten zieht, wurden in beiden Fällen die Parametrisierungen nur für  $x > 0,02$  angepasst.

Die Messreihen zur Bestimmung der Transferkoeffizienten und ihrer Parametrisierungen lieferten ebenfalls ein weiteres Indiz für die Sensibilität der Gasverstärkung und damit des gesamten Teststandes zur Bestimmung der Transferkoeffizienten. So ergab sich bei drei von fünf Messreihen für die Sammeleffizienz für Ionen ein merkwürdiger Verlauf, bei dem die Sammeleffizienz für niedrige Feldstärkenverhältnisse zunächst von einem Wert größer als eins auf das vom elektrostatischen Modell vorhergesagte Plateau abfällt. Dieses Verhalten und sein möglicher Zusammenhang mit den Druckänderungen wird im Anhang unter A diskutiert.



**Abbildung 4.7:** Sammeleffizienz für Elektronen für Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 und angepasste Parametrisierung



**Abbildung 4.8:** Produkt aus Extraktionseffizienz und Verstärkung zwischen den GEMs für Elektronen für Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 und angepasste Parametrisierung

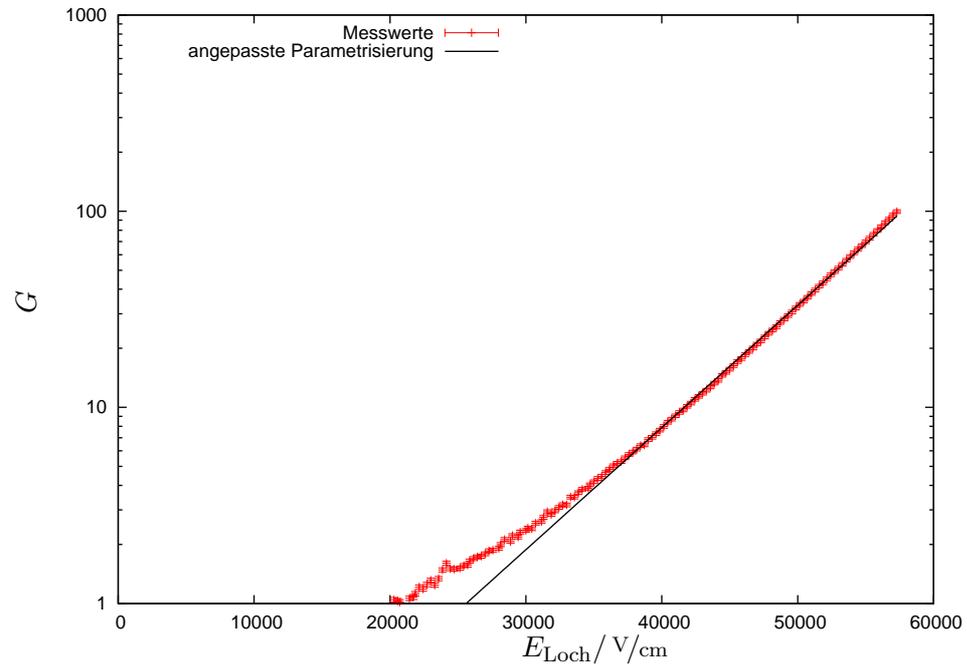


Abbildung 4.9: Verstärkung einer einzelnen GEM für Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 und angepasste Parametrisierung

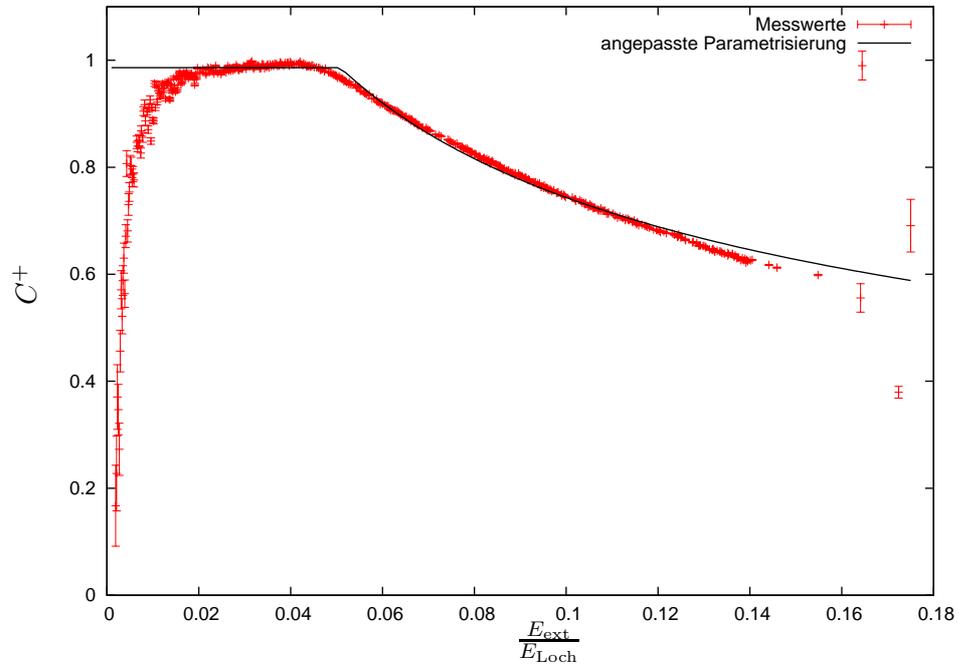


Abbildung 4.10: Sammeleffizienz für Ionen für Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 und angepasste Parametrisierung

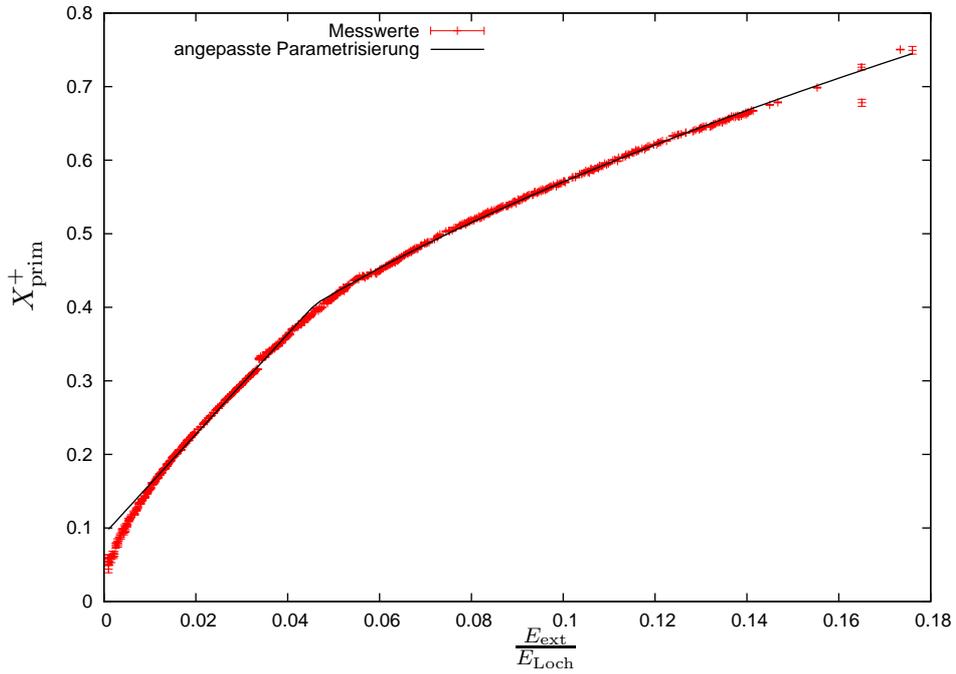


Abbildung 4.11: Primäre Extraktionseffizienz für Ionen für Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 und angepasste Parametrisierung

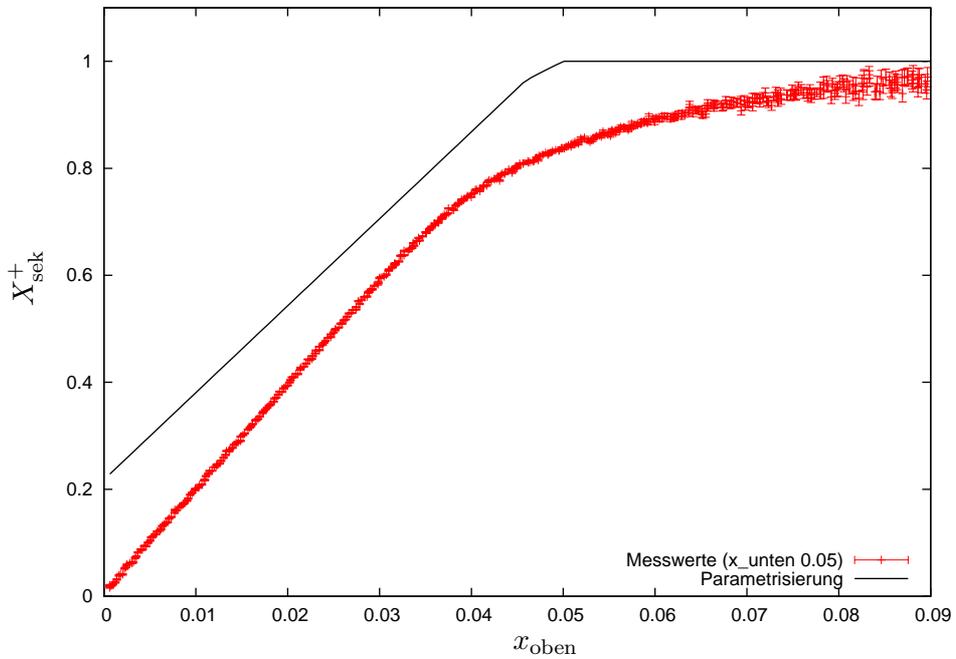
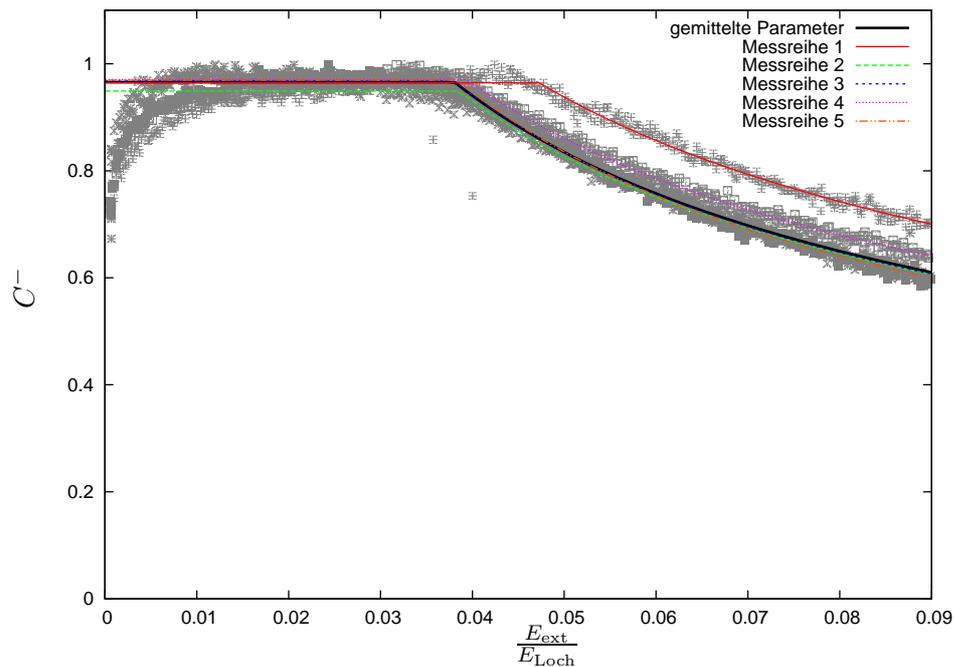


Abbildung 4.12: Sekundäre Extraktionseffizienz für Ionen für Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 und berechnete Parametrisierung, das Feldstärkenverhältnis auf der anderen GEM-Seite  $x_{\text{unten}}$  beträgt 0,05

In den angehängten Abbildungen C.1 bis C.5 sind die in den fünf durchgeführten Messreihen gefundenen Parametrisierungen aller Transferkoeffizienten außer der Elektronen-Sammeleffizienz jeweils zusammen mit einer Parametrisierung, welche die gemittelten Parameter aus Tabelle 4.4 verwendet, dargestellt. Trotz der fehlenden Reproduzierbarkeit der Parameter innerhalb der Fehlergrenzen weichen die Parametrisierungen nur wenig von der gemittelten Parametrisierung ab. Einzige Ausnahme bildet hierbei die Elektronen-Sammeleffizienz, deren Parametrisierungen in Abbildung 4.13 dargestellt sind. Wahrscheinlich haben sich Druckunterschiede zwischen den oder während der Messreihen bei der relativen Berechnung der Elektronen-Sammeleffizienz stark auf die Form des Plateaus bei niedrigen Feldstärkenverhältnissen ausgewirkt.



**Abbildung 4.13:** Parametrisierung der Sammeleffizienz für Elektronen bei Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 für alle fünf Messreihen und Parametrisierung mit gemittelten Parametern. In grau sind die Messdaten der fünf Messreihen eingezeichnet.

### 4.3 Vergleich der Gasmischungen

Im Vergleich mit den Transferkoeffizienten der TDR-Gasmischung fällt auf, dass für Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 die erreichbare Verstärkung in einer einzelnen GEM bei gleicher Spannung deutlich kleiner ist. Hierbei zeigt sich ebenfalls, dass der exponentielle Ansatz zur Beschreibung der Verstärkung zumindest für niedrige Feldstärken  $E_{\text{Loch}}$  bzw. geringe GEM-Spannungen die Messdaten nur unzureichend beschreibt. Die geringere Verstärkung zeigt sich ebenfalls bei der Verstärkung zwischen den GEMs, deren Effekt hier deutlich geringer, wenn nicht sogar bei den verwendeten Feldstärken zu vernachlässigen ist. Ursächlich für die geringeren Verstärkungen ist der große CO<sub>2</sub>-Anteil in der Gasmischung.

Im Unterschied zur TDR-Gasmischung fällt die Sammeleffizienz für Elektronen bei Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 für niedrige Feldstärkenverhältnisse  $\frac{E_{\text{ext}}}{E_{\text{Loch}}}$  ab. Außerdem ist das bei der Sammeleffizienz für Elektronen und Ionen auftretende Plateau bei Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 länger.

Aufgrund der geringeren Diffusion der Gasmischung Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 ist die Extraktionseffizienz für Elektronen und Ionen bei diesem Gas größer als für die TDR-Gasmischung.

Parameter		Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3
$C^-$	$r$	$0,219 \pm 0,005$	$0,179 \pm 0,002$	$0,170 \pm 0,002$
	$s$	$0,497 \pm 0,008$	$0,529 \pm 0,004$	$0,542 \pm 0,003$
	$\kappa$	$0,964 \pm 0,002$	$0,949 \pm 0,001$	$0,968 \pm 0,001$
$X^-$	$r$	$0,172 \pm 0,0004$	$0,172 \pm 0,0003$	$0,173 \pm 0,0003$
	$s$	$0,569 \pm 0,001$	$0,570 \pm 0,001$	$0,571 \pm 0,001$
	$g$	$0,0218 \pm 0,0002$	$0,0212 \pm 0,0002$	$0,0201 \pm 0,0002$
$G_{\text{par}}$	$e/\text{cm/V}$	$(35,8 \pm 2,5) \cdot 10^{-6}$	$(28,8 \pm 1,8) \cdot 10^{-6}$	$(32,3 \pm 1,8)10^{-6}$
	$z/\text{V/cm}$	$7660 \pm 59$	$7616 \pm 40$	$7418 \pm 56$
$G$	$\alpha/\text{cm/V}$	$(142 \pm 1) \cdot 10^{-6}$	$(1442 \pm 5) \cdot 10^{-7}$	$(1434 \pm 5) \cdot 10^{-7}$
	$\beta$	$0,0270 \pm 0,0013$	$0,0270 \pm 0,0006$	$0,0262 \pm 0,0007$
$C^+$	$r$	$0,304 \pm 0,002$	$0,299 \pm 0,002$	$0,274 \pm 0,001$
	$s$	$0,390 \pm 0,002$	$0,401 \pm 0,002$	$0,434 \pm 0,002$
	$\kappa$	$0,997 \pm 0,001$	$0,989 \pm 0,001$	$0,997 \pm 0,001$
$X_{\text{prim}}^+$	$r$	$0,258 \pm 0,003$	$0,253 \pm 0,002$	$0,249 \pm 0,001$
	$s$	$0,435 \pm 0,003$	$0,447 \pm 0,003$	$0,451 \pm 0,001$
	$g$	$0,0882 \pm 0,0010$	$0,0956 \pm 0,0008$	$0,0895 \pm 0,0008$

**Tabelle 4.3:** In den ersten drei Messreihen ermittelte Parameter für Ar:CO<sub>2</sub> 70:30

Parameter		Messreihe 4	Messreihe 5	Mittelwert
$C^-$	$r$	$0,198 \pm 0,002$	$0,159 \pm 0,001$	$0,175 \pm 0,015$
	$s$	$0,501 \pm 0,003$	$0,563 \pm 0,003$	$0,533 \pm 0,024$
	$\kappa$	$0,970 \pm 0,001$	$0,969 \pm 0,001$	$0,966 \pm 0,007$
$X^-$	$r$	$0,173 \pm 0,0004$	$0,173 \pm 0,0004$	$0,173 \pm 0,0004$
	$s$	$0,570 \pm 0,001$	$0,568 \pm 0,001$	$0,570 \pm 0,001$
	$g$	$0,0199 \pm 0,0002$	$0,0205 \pm 0,0002$	$0,0207 \pm 0,0007$
$G_{\text{par}}$	$e/\text{cm/V}$	$(32,5 \pm 2,0) \cdot 10^{-6}$	$(33,5 \pm 2,1) \cdot 10^{-6}$	$(32,1 \pm 2,2) \cdot 10^{-6}$
	$z/\text{V/cm}$	$7493 \pm 59$	$7464 \pm 60$	$7545 \pm 91$
$G$	$\alpha/\text{cm/V}$	$(1435 \pm 5) \cdot 10^{-7}$	$(1433 \pm 6) \cdot 10^{-7}$	$(1435 \pm 6) \cdot 10^{-7}$
	$\beta$	$0,0254 \pm 0,0006$	$0,0272 \pm 0,0007$	$0,0265 \pm 0,0007$
$C^+$	$r$	$0,288 \pm 0,002$	$0,281 \pm 0,001$	$0,286 \pm 0,011$
	$s$	$0,418 \pm 0,002$	$0,426 \pm 0,002$	$0,416 \pm 0,016$
	$\kappa$	$0,986 \pm 0,001$	$0,993 \pm 0,001$	$0,992 \pm 0,004$
$X_{\text{prim}}^+$	$r$	$0,249 \pm 0,001$	$0,258 \pm 0,002$	$0,252 \pm 0,004$
	$s$	$0,451 \pm 0,002$	$0,442 \pm 0,002$	$0,447 \pm 0,006$
	$g$	$0,0913 \pm 0,0008$	$0,0942 \pm 0,0010$	$0,0919 \pm 0,0027$

**Tabelle 4.4:** In zwei späteren Messreihen ermittelte Parameter für Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 und über alle fünf Messreihen gemittelte Parameter

---

## 5 Fazit

Es ist im Rahmen dieser Arbeit gelungen, die Transferkoeffizienten für die Gasmischung Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 zu bestimmen und die aus einem elektrostatischen Modell stammenden Parametrisierungen an diese anzupassen. Dabei zeigt sich, dass die Parametrisierungen das Verhalten der Verstärkung einer einzelnen GEM, vor allem im Bereich niedriger Feldstärken, nur unzureichend beschreiben. Offensichtlich versagt bei niedrigen Feldstärken  $E_{\text{Loch}}$  in den GEM-Löchern der exponentielle Ansatz zur Beschreibung der Verstärkung. Eine mögliche Ursache dafür, dass der exponentielle Ansatz die Verstärkung für die TDR-Gasmischung deutlich besser beschreibt, könnte der hohe CO<sub>2</sub>-Anteil bei Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 sein.

Die quantitative Aussagekraft der gefundenen Parameter bleibt allerdings aufgrund der fehlenden Konstantdruckregelung und des insgesamt unbekanntem Kammerdrucks fraglich. Daher wäre es sinnvoll, die Messreihen mit einer Konstantdruckregelung zu wiederholen. Ebenfalls könnte eine genauere Analyse der Druckabhängigkeit der Transferkoeffizienten interessant sein. Dies wäre auch ein weiterer Schritt in Richtung der Berechnung der Transferkoeffizienten aus den Eigenschaften des Gasgemischs (z.B. Diffusion und mittlere freie Weglänge). Bei Verwendung der gewonnenen Parametrisierungen zu Simulationen zur Minimierung des Ionenrückdrifts sollten die Ergebnisse einer solchen Simulation auf jeden Fall einer experimentellen Überprüfung unterzogen werden.

Für weitere Messungen wäre eine stärkere radioaktive Quelle (Größenordnung 1 GBq) zu empfehlen, um den Einfluss von Störsignalen auf die zu messenden Ströme zu minimieren und generell ein besseres Signal-zu-Rauschen-Verhältnis zu erreichen.

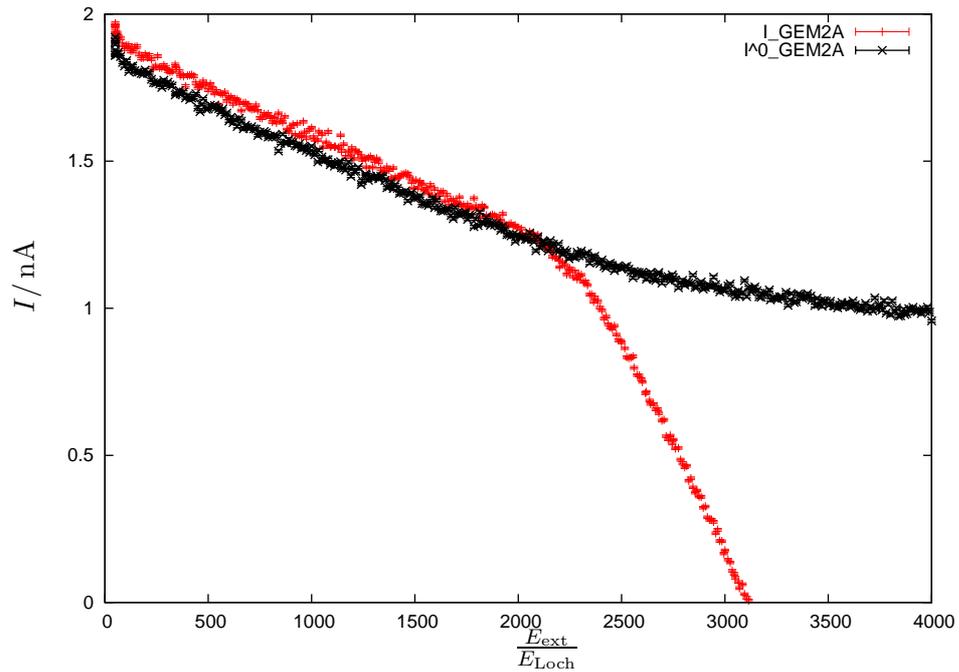


## A Auffälliges Verhalten der Ionen-Sammeleffizienz

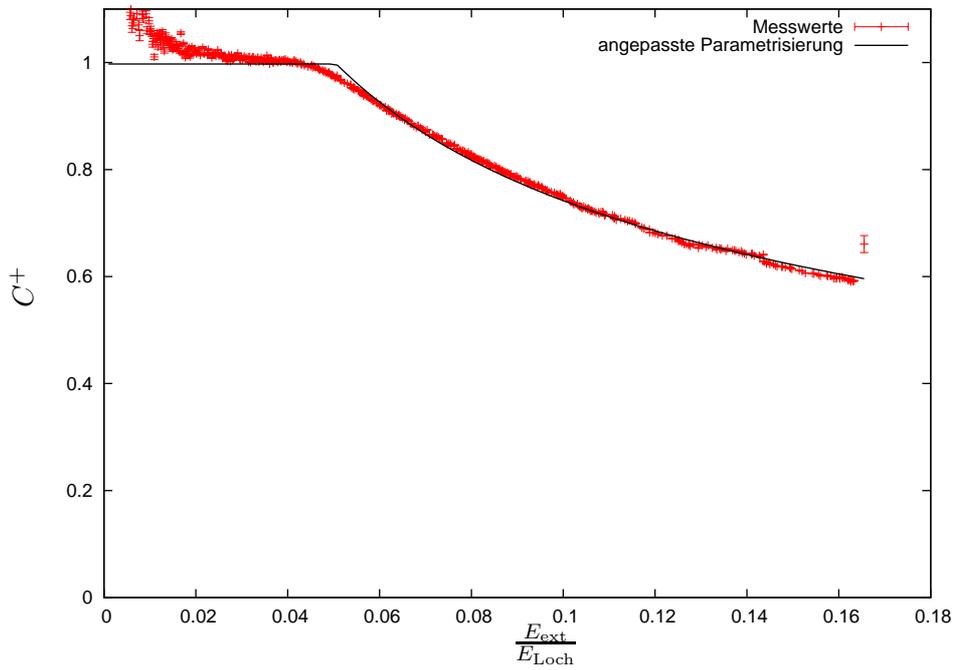
Bei der Berechnung der Sammeleffizienz für Ionen aus den gemessenen Strömen wird nach Gleichung (2.22) eine Referenzmessung bei ausgeschalteter GEM3 benötigt. Zwischen der eigentlichen Messung und der Referenzmessung liegt dabei ein Zeitraum von ungefähr 5 bis 6 Stunden. Der Strom  $I_{\text{GEM2A}}$  setzt sich aus den in GEM2 erzeugten aber nicht extrahierten Elektronen und den aus GEM3 extrahierten Ionen, welche bei GEM2 nicht eingesammelt wurden, zusammen. Somit besteht der bei der Referenzmessung gewonnene Strom  $I_{\text{GEM2A}}^0$  nur noch aus den aus GEM2 nicht extrahierten Elektronen. Somit kann  $I_{\text{GEM2A}}^0$  nur größer als  $I_{\text{GEM2A}}$  sein, da Elektronenströme positive und Ionenströme negative gemessene Ströme verursachen.

Bei den Messreihen mit dem auffälligen Verhalten war dies nicht der Fall. Hier war bei kleinen Feldstärkenverhältnissen  $I_{\text{GEM2A}}^0$  kleiner als  $I_{\text{GEM2A}}$ , wodurch das Vorzeichen des Zählers in (2.22) positiv wird. Da der Nenner definitionsgemäß negativ ist, entstehen somit Werte für die Sammeleffizienz für Ionen größer als eins.

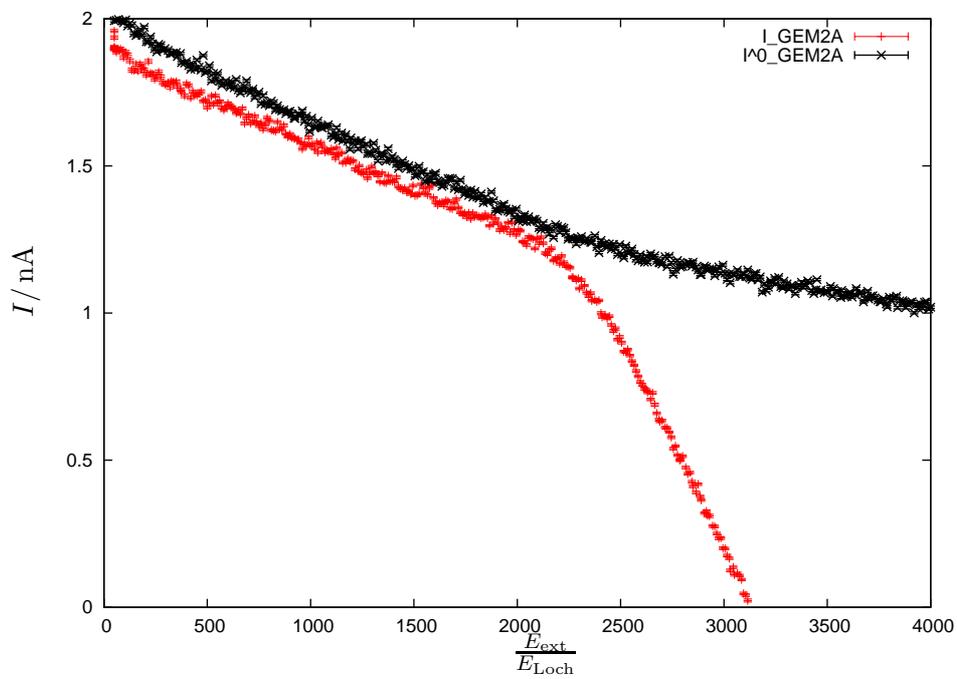
In Abbildung A.1 sind die Ströme  $I_{\text{GEM2A}}$  und  $I_{\text{GEM2A}}^0$  einer Messreihe aufgetragen, bei der sich offenbar der Kammerdruck zwischen Messung und Referenzmessung verändert hat. Somit war hier  $I_{\text{GEM2A}} > I_{\text{GEM2A}}^0$ , was zu einem Verhalten der Ionen-Sammeleffizienz wie in Abbildung A.2 führt. Ein normales Verhalten der Ströme  $I_{\text{GEM2A}}$  und  $I_{\text{GEM2A}}^0$ , welches zu dem gewohnten und nachvollziehbaren Verhalten der Ionen-Sammeleffizienz führt, ist in Abbildung A.3 illustriert.



**Abbildung A.1:**  $I_{\text{GEM2A}}$  und  $I_{\text{GEM2A}}^0$  einer Messreihe bei der sich zwischen Messung und Referenzmessung der Kammerdruck verändert hat, dadurch ist  $I_{\text{GEM2A}}$  für kleine Transfeldstärken  $E_{T2}$  größer als  $I_{\text{GEM2A}}^0$



**Abbildung A.2:** Gemessene Ionen-Sammeleffizienz für Ar:CO<sub>2</sub> 70:30, bei dieser Messreihe hat sich wahrscheinlich der Kammerdruck zwischen Messung und Referenzmessung verändert



**Abbildung A.3:**  $I_{\text{GEM2A}}$  und  $I^0_{\text{GEM2A}}$  einer Messreihe bei der keine Anzeichen für eine Veränderung des Kammerdrucks zwischen Messung und Referenzmessung bestehen

---

## B Tabellen

$E_D/V/cm$	$U_{GEM1}/V$	$E_{T1}/V/cm$	$U_{GEM2}/V$	$E_{T2}/V/cm$	$U_{GEM3}/V$	$E_I/V/cm$
0...4500	320	2500	315	2500	315	0
200	310	2500	310	2500	310	0...9000
1000	310	2500	320	0...6000	320	0
200	320	2500	320	600	0...400	4000

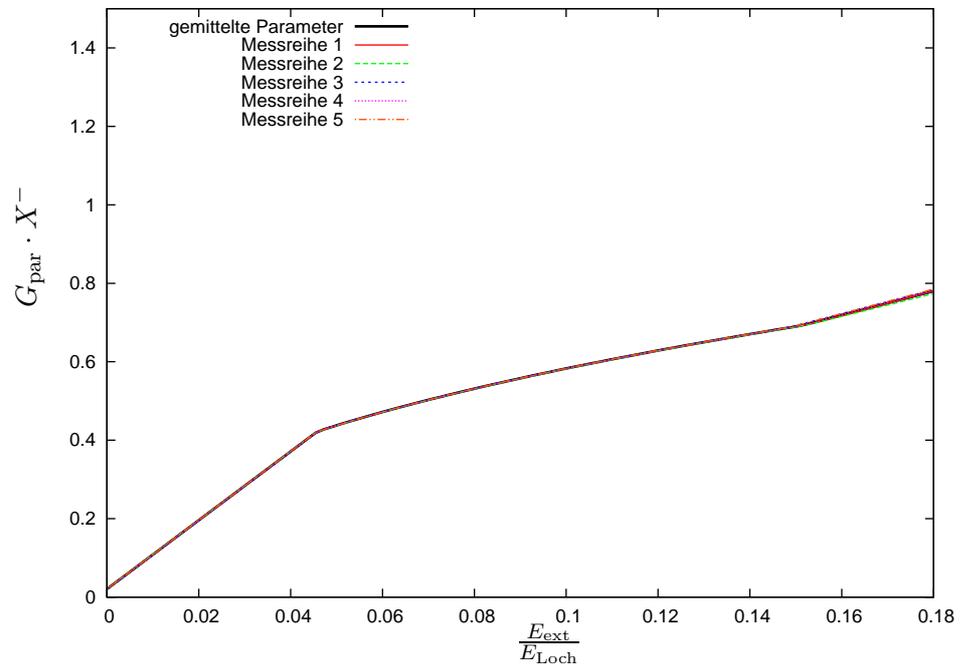
**Tabelle B.1:** Spannungen und elektrische Feldstärken, welche für die Bestimmung der Transferkoeffizienten der TDR-Gasmischung verwendet wurden

$E_D/V/cm$	$U_{GEM1}/V$	$E_{T1}/V/cm$	$U_{GEM2}/V$	$E_{T2}/V/cm$	$U_{GEM3}/V$	$E_I/V/cm$
0...4500	350	2500	350	2500	350	0
200	350	2500	350	2500	350	0...9000
1000	350	2500	350	0...9000	350	0
200	350	2500	350	600	0...400	4000

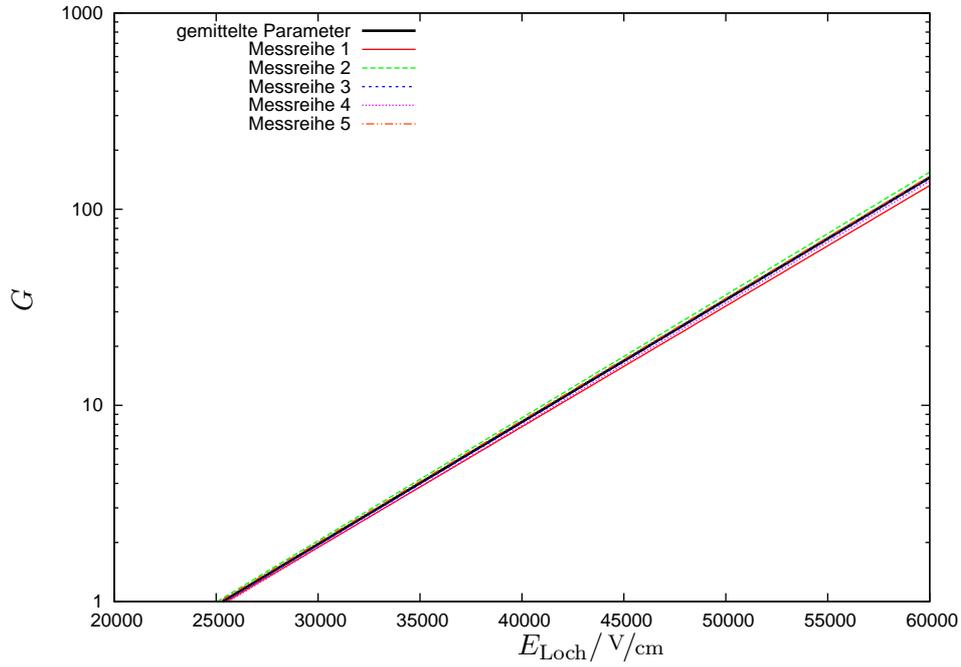
**Tabelle B.2:** Spannungen und elektrische Feldstärken, welche für die Bestimmung der Transferkoeffizienten der Gasmischung ArCO<sub>2</sub> 70:30 verwendet wurden



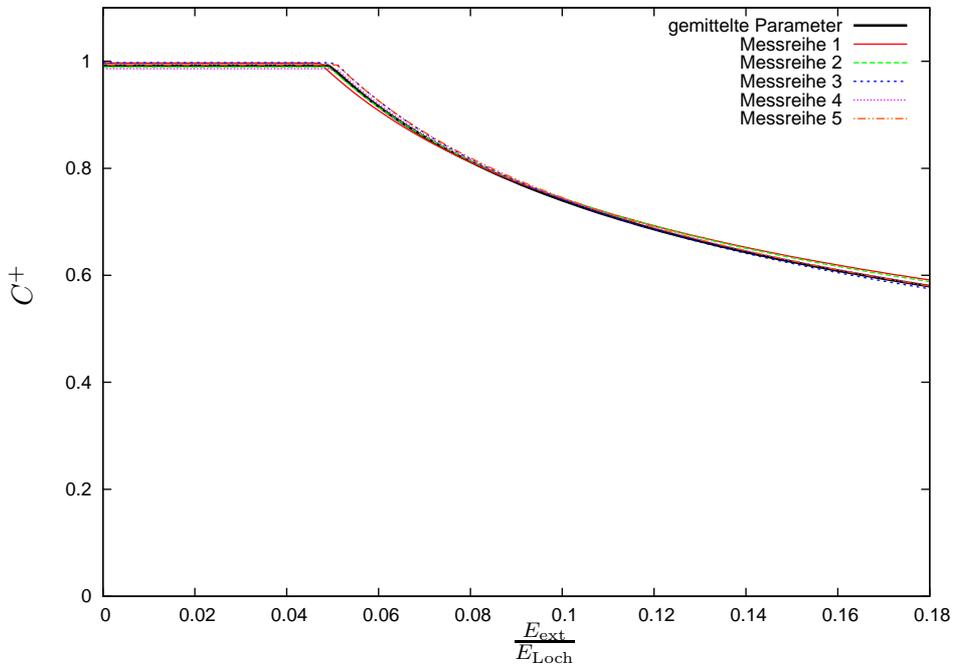
## C Abbildungen



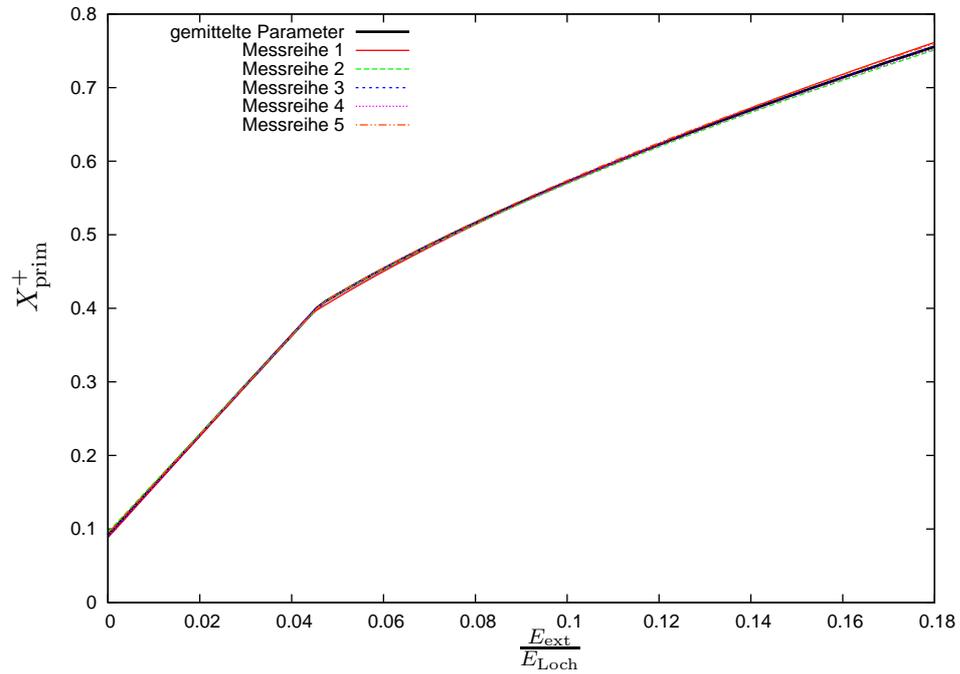
**Abbildung C.1:** Parametrisierung des Produkts aus Extraktionseffizienz und Verstärkung zwischen den GEMs für Elektronen bei Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 für alle fünf Messreihen und Parametrisierung mit gemittelten Parametern



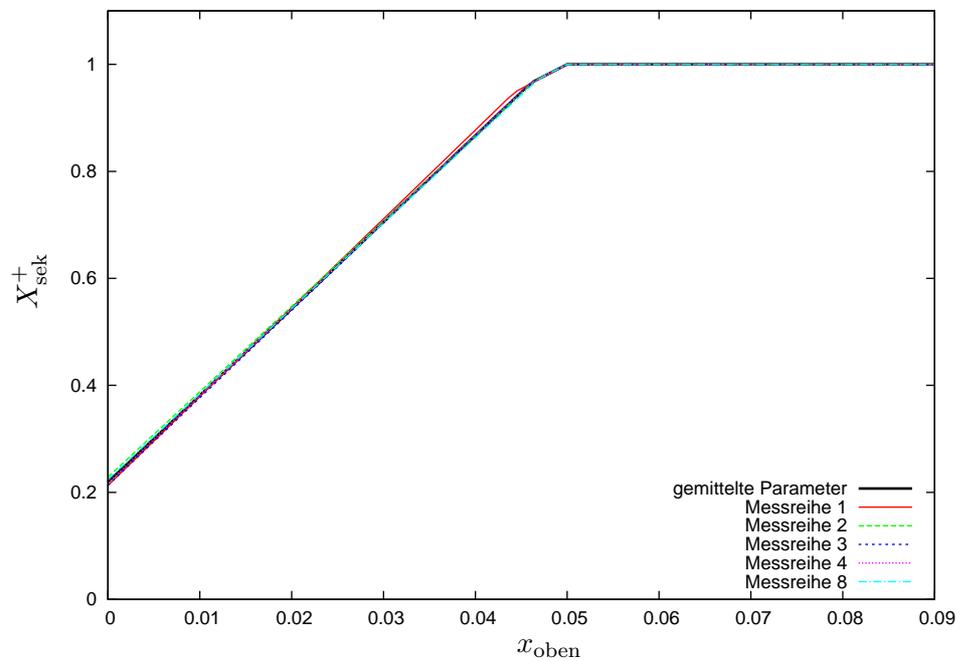
**Abbildung C.2:** Parametrisierung der Verstärkung einer einzelnen GEM bei Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 für alle fünf Messreihen und Parametrisierung mit gemittelten Parametern



**Abbildung C.3:** Parametrisierung der Sammeleffizienz für Ionen bei Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 für alle fünf Messreihen und Parametrisierung mit gemittelten Parametern



**Abbildung C.4:** Parametrisierung der primären Extraktionseffizienz für Ionen bei Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 für alle fünf Messreihen und Parametrisierung mit gemittelten Parametern



**Abbildung C.5:** Parametrisierung der sekundären Extraktionseffizienz für Ionen bei Ar:CO<sub>2</sub> 70:30 für alle fünf Messreihen und Parametrisierung mit gemittelten Parametern. Das Feldstärkenverhältnis auf der anderen GEM-Seite  $x_{\text{unten}}$  beträgt 0,05.



---

## Literatur

- [1] *Homepage der Gas Detectors Development Group.* – <http://gdd.web.cern.ch/GDD/>
- [2] BEISSEL, F.: *Manual of HV Current Monitor Revision V3.0*, 1999
- [3] GIOMATARIS, Y. ; REBOURGEARD, P. ; ROBERT, J. P. ; CHARPAK, Georges: MICROMEGAS: A high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments. In: *Nucl. Instrum. Meth.* A376 (1996), S. 29–35
- [4] LOTZE, S.: *Ion Backdrift Minimisation in a GEM-Based TPC Readout*, III. Physikalisches Institut, RWTH Aachen, Diss., 2006
- [5] *Kapitel 28. Particle detectors.* In: PARTICLE DATA GROUP: *Particle Physics Booklet*. Elsevier, 2008
- [6] SAULI, F.: GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors. In: *Nucl. Instrum. Meth.* A386 (1997), S. 531–534
- [7] SOBLOHER, B.: *Simulationsstudien zu GEM-Folien für die Auslese einer TPC*, III. Physikalisches Institut, RWTH Aachen, Diplomarbeit, 2002
- [8] *TESLA Technical Design Report.* 2001. – DESY 2001-011, ECFA 2001-209



---

## Danksagung

Vielen Dank an die Kollegen der TPC-Gruppe des 3. Physikalischen Instituts der RWTH Aachen, besonders an Sven Lotze, von dem wir die Strommesskammer übernehmen konnten, und an Franz Beißel, der die von ihm entwickelten CUMOs und den Floating-High-Voltage-Prototypen zur Verfügung gestellt hat. Ohne diese wären die dieser Arbeit zugrunde liegenden Messungen nicht möglich gewesen.



Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Zitate kenntlich gemacht habe.

Bonn, 28. Juli 2009

Unterschrift .....