

Protokoll: Driftgeschwindigkeit

Versuchstag: 26.01.2009

Kathrin Ender, Michael Walz

Gruppe 101

Inhaltsverzeichnis

A Grundlagen	3
1 Ziel des Versuches	3
2 Diffusion	3
3 Driftgeschwindigkeit	3
4 Ramsauereffekt	4
5 Zählgase und Quencher	4
B Experiment	6
6 Messprinzip	6
6.1 Partialdrücke	7
7 Messungen	7
8 Durchführung	7
C Auswertung	9
9 Zur Auswertung	9
10 Zur Fehlerrechnung	9
11 Verschiedene Mischungsverhältnisse	10
12 Druckabhängigkeit	13

Teil A

Grundlagen

1 Ziel des Versuches

In diesem Versuch wird der Transportprozess von Elektronen unter Einfluss eines elektrischen Feldes in Gasen untersucht. Der Transportprozess von Elektronen setzt sich aus einer Überlagerung von ungerichteter Diffusion und der gerichteten Bewegung entlang der Feldlinien zusammen. Man betrachtet die Driftgeschwindigkeit von Elektronen in verschiedenen Argon-Methan-Mischungen in Abhängigkeit vom reduzierten elektrischen Feld.

2 Diffusion

Im Versuch wird das Gas durch einen Laserstrahl ionisiert. Die so entstandenen Elektronen stoßen mit den Gasmolekülen und geben dabei einen Teil ihrer Energie ab, bis sie im thermischen Gleichgewicht sind. Die Maxwell-Boltzmann-Verteilungsfunktion beschreibt die Energieverteilung:

$$F(\varepsilon)d\varepsilon = C\sqrt{\varepsilon} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon}{k_B T}\right) d\varepsilon$$

Die mittlere Energie der Elektronen berechnet sich damit zu:

$$\langle \varepsilon \rangle = \int \varepsilon \cdot F(\varepsilon) \cdot d\varepsilon = \frac{3}{2} kT$$

Dieses Ergebnis erwartet man auch auf Grund des Gleichverteilungssatzes.

Die entstandene Ladungsverteilung diffundiert auf Grund der Brown'schen Bewegung in den Raum. Da bei dieser ungerichteten Bewegung der Ladungsschwerpunkt erhalten bleibt, kann die Ausbreitung durch ein zerfließendes Gaußpaket beschrieben werden:

$$\frac{dN}{dx} = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi Dt}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

N_0 ist die Gesamtzahl der Ladungsträger und D ist der Diffusionskoeffizient. Der Diffusionskoeffizient hängt von der mittleren freien Weglänge λ und der mittleren Geschwindigkeit \bar{v} der Teilchen ab.

$$D = \frac{1}{3} \bar{v} \lambda$$

Die mittlere freie Weglänge wiederum hängt von der Teilchenzahldichte n und dem energieabhängigen Streuquerschnitt $\sigma(\varepsilon)$ ab.

3 Driftgeschwindigkeit

Elektronen im Gas mit einem äußeren elektrischen Feld stoßen immer wieder mit den Gasmolekülen. Da sie nach jedem Stoß ihrer vorherige Bewegungsrichtung „vergessen“ werden sie nur zwischen den Stößen durch das elektrische Feld entlang der Feldlinien beschleunigt. Im homogenen elektrischen Feld ist die Driftgeschwindigkeit der Quotient aus der mittleren Wegstrecke, die die Elektronen zwischen zwei Stößen zurücklegen und der mittleren Zeit zwischen zwei Stößen.

$$v_D = \frac{\langle x \rangle}{\tau} = \frac{\frac{e}{m} E \tau^2}{\tau} = \underbrace{\frac{e\tau}{m}}_{=\mu} \cdot E$$

μ wird auch als Beweglichkeit bezeichnet.

Es ist intuitiv, dass die Zeit zwischen zwei Stößen antiproportional zur Teilchenzahl im Volumen ist, d.h. je mehr Teilchen desto kürzer ist τ . Die Teilchenzahl wiederum ist bei konstantem Volumen proportional zum Druck. Für die Driftgeschwindigkeit gilt also:

$$v_D \propto E \cdot \tau \propto \frac{E}{N} \propto \frac{E}{P}$$

Die Driftgeschwindigkeit wird daher im Versuch gegen das „reduzierte elektrische Feld“ E/P aufgetragen.

Außerdem ist für den Versuch von Bedeutung, dass die Driftgeschwindigkeit antiproportional zum Streuquerschnitt ist. Auch dies ist leicht ersichtlich: bei großen Streuquerschnitt stoßen die Elektronen mit den Gasmolekülen häufiger, d.h. τ ist kurz, was wiederum bedeutet, dass auch die Driftgeschwindigkeit klein ist.

4 Ramsauereffekt

Der Ramsauereffekt tritt bei der Streuung von langsamen Elektronen an Edelgasatomen auf. Der Streuquerschnitt $\sigma(\varepsilon)$ nimmt bei bestimmten (niedrigen) Elektronenenergien das sogenannte Ramsauerminimum an und fällt damit weit unter den durch die kinetische Gastheorie vorhergesagten Wert ab. Dieses Minimum des Streuquerschnittes lässt sich quantenmechanisch jedoch einfach erklären. Liegt die Wellenlänge des Elektrons in der Größenordnung des Atompotentials, so wird das Elektron durch einen quantenmechanischen Interferenzeffekt quasi „durchsichtig“. Dies hat eine deutliche Absenkung des Streuquerschnittes zur Folge. Im folgenden Graph sind die Streuquerschnitte von Argon, Xenon und Helium in Abhängigkeit der Energie dargestellt. Für Argon und Xenon ist das Ramsauerminimum erkennbar, während Helium in dem dargestellten Energiebereich keines aufweist.

Das Absinken des Streuquerschnitts hat einen Anstieg der Driftgeschwindigkeit zur Folge. Untersuch man also die Driftgeschwindigkeit, so ist bei den Energien, bei denen der Streuquerschnitt ein Minimum aufweist, ein Maximum der Driftgeschwindigkeit zu erwarten.

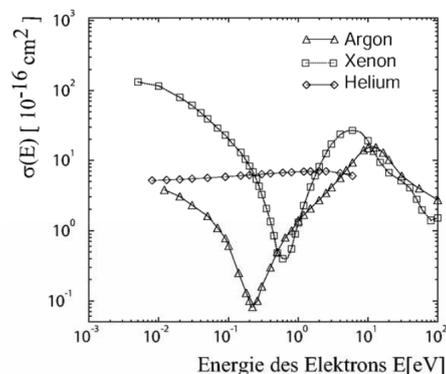


Fig. 7-1.1: Abhängigkeit des elastischen Streuquerschnitts von der kinetischen Energie der Elektronen für die drei Edelgase Helium, Argon und Xenon

Quelle: Einführung in das Kernphysikalische Praktikum von F.K. Schmidt

5 Zählgase und Quencher

Ein Zählgas besteht in der Regel aus einem Edelgas und einem zugesetzten Löschgase (auch Quencher genannt). Das Edelgas dient zur Ladungsvervielfachung, während das Löschgase verhindern soll, dass es zu einer permanenten Gasentladung kommt. Bei dem Prozess der Ladungsvervielfachung entstehen jedoch auch Photonen, die eine Sekundäremission von Elektronen und damit einer permanente Gasentladung hervorrufen könnten. Als Löschgase verwen-

det man daher meist ein mehratomiges organisches unpolares Gas (z.B. CH_4 , C_3H_8 , C_2H_6). Solche Gase besitzen Rotations- und Vibrationsniveaus und können daher die Photonen absorbieren und somit eine permanente Gasentladung verhindern.

Wie hoch der Anteil des Löschgases ist hat aber auch einen großen Einfluss auf die Driftgeschwindigkeit von Elektronen in dem Zahlgas. Im Versuch werden wir daher verschieden Argon-Methan-Mischungen betrachten. Bei reinem Argon liegt die Elektronenergie schon bei niedrigen reduzierten elektrischen Feldern über der Energie des Ramsauerminimums von Argon, weshalb die Elektronen elastisch mit dem Argon stoßen und damit ihre hohe Energie nicht verlieren, so dass eine niedrige Driftgeschwindigkeit resultiert. Ist dem Argon jedoch ein Löschgas (in unserem Fall Methan) beigemischt, so stoßen die Elektronen mit dem Löschgas inelastisch, indem sie Energie an die Rotations- und Vibrationsniveaus abgeben. Die Elektronen verlieren dadurch so viel Energie, dass sie in den Energiebereich des Ramsauerminimums von Argon kommen, was eine hohe Driftgeschwindigkeit zur Folge hat. Je mehr Methan beigemischt wird desto höher ist das Maximum der Driftgeschwindigkeit.

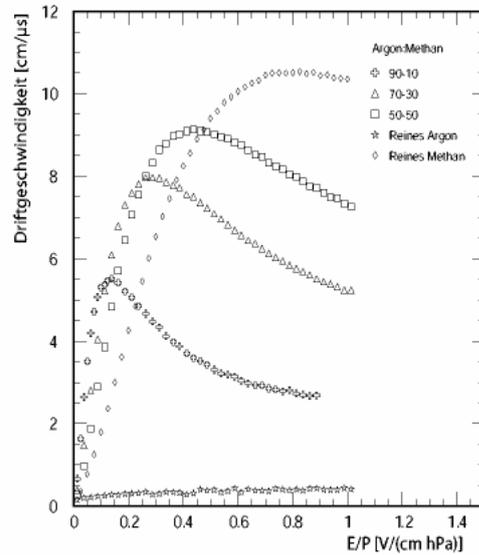


Fig. 7-1.3: Änderung des Driftgeschwindigkeitsverlaufs einer Argon-Methan-Mischung mit zunehmendem Methananteil.

Quelle: Einführung in das Kernphysikalische Praktikum von F.K. Schmidt

Teil B

Experiment

6 Messprinzip

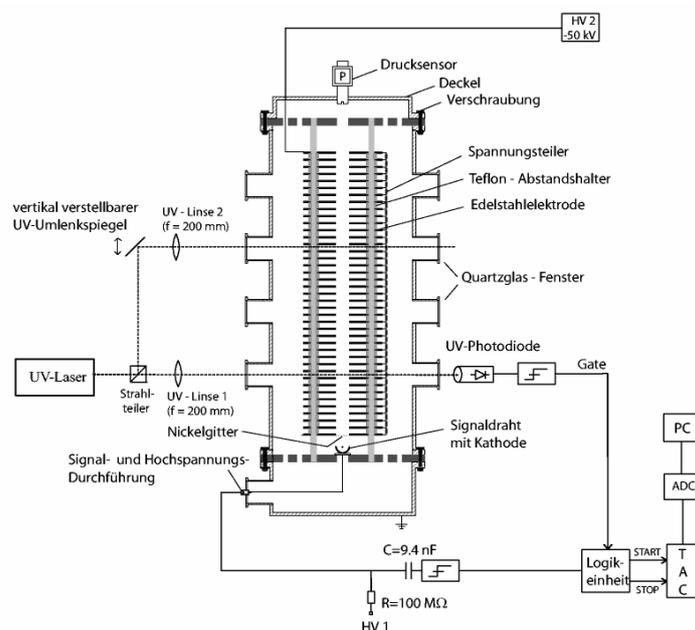


Fig. 7-1.4: Schematischer Versuchsaufbau.

Quelle: Einführung in das Kernphysikalische Praktikum von F.K. Schmidt

Die Messung im Experiment wird in der oben schematisch dargestellten Apparatur durchgeführt. Im Innern wird das zu untersuchende Gasgemisch eingestellt (vgl. 6.1). Durch den Impuls eines Stickstoff-UV-Lasers¹ wird an zwei Stellen eine Ladungswolke durch Ionisation erzeugt. Damit beide Ladungswolken zu gleichen Zeit entstehen werden sie durch den selben Laserimpuls, der an einem Strahlteiler geteilt und über zwei Linsen fokussiert wird, erzeugt. Über die scheibenförmigen Elektroden im Inneren wird durch einen hochpräzisen Spannungsteiler ein Driftfeld so angelegt, dass die Ladungswolken zum Detektor (im Bild: nach unten) wandern. Da das Feld homogen ist, ist die Driftgeschwindigkeit konstant. Die durch Diffusion in alle Richtungen auftretende Geschwindigkeitskomponente braucht hier nicht beachtet werden.

Die Driftgeschwindigkeit lässt sich dann über

$$v_{\text{Drift}} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

berechnen. Dabei ist Δx der Abstand der beiden Entstehungspunkte der durch Laserimpulse erzeugten Ladungswolken. Δt ist die Zeitdauer, die die zweite Ladungswolke nach der ersten beim Detektor ankommt.

Über die verschiedenen Schaltungen wird das Signal zur PC-Auswertung aufbereitet. Besonders zu erwähnen ist hier die Logikeinheit, die durch eine Photodiode zeitgleich mit dem Entstehen der Ladungswolken getriggert wird, und die dafür sorgt, dass nur zwei aufeinanderfolgenden Signale registriert werden, wenn diese auch wirklich durch einen Laserpuls

¹ gepulster Stickstoff-UV-Laser: $\lambda = 337,1 \text{ nm}$; $\Delta t < 500 \text{ ps}$

erzeugt wurden. Die Datenaufnahme am PC erlaubt die automatische Mittelung über durch viele Laserpulse erzeugte Messdaten² und kann direkt die mittlere Driftzeit Δt und ihre Standardabweichung angeben.

6.1 Partialdrücke

Insgesamt darf der Druck in der Kammer nicht über 1500 hPa steigen. Um die richtigen Mischungsverhältnisse einstellen zu können, muss über das ideale Gasgesetz $pV = NkT$ die Partialdrücke berechnet werden. Dann gilt:

$$P_{\text{ges}} = P_1 + P_2 \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

So erhält man zum Beispiel für einen Gesamtdruck $P_{\text{ges}} = 1000$ hPa und einem Mischungsverhältnis³ von 80:20 die folgenden Partialdrücke:

$$P_1 = 800 \text{ hPa} \quad P_2 = 200 \text{ hPa}$$

7 Messungen

- Zuerst wird bei festem Druck die Driftgeschwindigkeiten von reinem Methan, von einer Argon-Methan-Mischung im Verhältnis 90:10 und von zwei weiteren Mischungsverhältnissen bestimmt. Hierbei werden jeweils beide Driftstrecken zur Messung berücksichtigt. Bei auf Dauerbetrieb geschaltetem Laser können bis zu 100 Messwerte pro E-Feld gemessen und automatisch gemittelt werden. Die Schrittweite des reduzierten Feldes E/p wird über die Spannung HV2 bestimmt und sollte ca. $0,02 \frac{\text{V}}{\text{cm} \cdot \text{hPa}}$ betragen.
- Zusätzlich wird für eine Mischung über beide Driftstrecken die Driftgeschwindigkeit bei drei verschiedenen Drücken gemessen. Die Hochspannung wird so angepasst, dass das reduzierte Feld bei allen drei Messungen gleich bleibt. Dementsprechend sollte für alle Messungen die gleiche Driftgeschwindigkeit gemessen werden.

8 Durchführung

Zunächst musste in der Messapparatur das gewünschte Mischungsverhältnis von Argon und Methan hergestellt werden. Wie bereits beschrieben macht man sich dabei einfach zu nutze, dass das Volumenverhältnis dem der Partialdrücke entspricht. Wir füllten also zunächst die evakuierte Apparatur mit Argon bis der gewünschte Partialdruck erreicht war, und füllten schließlich mit Methan bis zum gewünschten Gesamtdruck auf. Für den ersten Aufgabenteil wählten wir einen Gesamtdruck von ungefähr 1bar. Zwischen den Messungen zu unterschiedlichen Mischungsverhältnissen musste also evakuiert werden. Wir maßen für jede Mischung die Driftgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom reduzierten Feld jeweils für beide zur Verfügung stehenden Driftstrecken ($x_d = 24\text{cm}$ und $x_d = 36\text{cm}$). Damit die beiden Signale korrekt detektiert werden könnten, müssten sie deutlich genug sein. Am Oszilloskop waren beide Impulse zu erkennen. Die Hochspannung HV1 stellten wir so ein, dass der zweite Peak gut zu erkennen und größer als der Unterschwinger des ersten Peaks war. (Dieser Unterschwinger bereitet uns einige Probleme, da es mehrfach vorkam, dass wir umjustieren mussten, da der Unterschwinger als zweiter Peak interpretiert wurde, was viel zu kurze Driftzeiten lieferte.) Das reduzierte Feld variierten wir über einstellen der Spannung HV2 (von 2kV bis 21kV in 1kV

² natürlich bei gleichem Druck und E-Feld

³ Bei idealen Gasen ist das Volumen-Mischungsverhältnis gleich dem Teilchen-Mischungsverhältnis.

Schritten). Mit Labview wurden zu jedem Spannungswert 30 Driftzeiten aufgenommen, wobei Labview gleich automatisch Mittelwert und Standardabweichung berechnete (Messwerte, die außerhalb der zweifachen Standardabweichung lagen wurden von Labview verworfen).

Im zweiten Aufgabenteil sollten wir die Driftgeschwindigkeit in reinem Methan in Abhängigkeit vom reduzierten Feld bei verschiedenen Drücken messen. Leider gelang es uns auch mit Hilfe des Betreuers nicht alles so zu justieren, dass wir vernünftige Messwerte erhielten. Daher verwenden wir in der Auswertung zu diesem Aufgabenteil nicht unsere eigenen Messdaten.

Teil C

Auswertung

9 Zur Auswertung

Alle Messwerte befinden sich im handgeschrieben angehängten Versuchsprotokoll. Diese Werte wurden am Computer abgetippt und dem Programm GNUPLOT⁴ zur Graphenerstellung übergeben.

Die meisten Messwerte mussten aufgrund der Ablesekalen (oder aus sonstigen Gründen) noch umgerechnet werden. Aufgrund des massiven Rechenaufwandes erledigten wir dies direkt am Computer entweder mit GNUPLOT oder mit einer Tabellenkalkulation. Unter GNUPLOT geschah dies mittels der Option „using“⁵.

10 Zur Fehlerrechnung

Für die Fehlerfortpflanzung von statistischen Fehlern wird im Allgemeinen das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz (Formel 4 im Fehlerrechnungsskript⁶) benutzt. Für systematische Fehler müsste man, da die statistische Unabhängigkeit dieser Messabweichungen nicht gegeben ist, eine Größtfehlerabschätzung nach Formel 5 vornehmen. Um die beiden Fehlerarten trotzdem sinnvoll im gleichem Schaubild darzustellen, werden wir sie mit Hilfe des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz addieren.

Für die Fehler von Längen- oder Spannungsangaben wurde mindestens ein systematischer Fehler von der halben Skalenordnung angenommen.

In den folgenden Graphen wird jeweils die Driftgeschwindigkeit v_D in Abhängigkeit vom reduzierten elektrischen Feld E/P dargestellt. Die Fehler, mit denen die Messpunkte jeweils behaftet sind, werden durch Fehlerbalken angegeben. Die Driftgeschwindigkeit berechnet sich aus der eingestellten Driftstrecke x_d (es kann $x_d = 24\text{cm}$ oder $x_d = 36\text{cm}$ eingestellt werden) und der Zeit t , die der zweite Puls nach dem ersten registriert wird.

$$v_D = \frac{x_d}{t}$$

Die Driftstrecke wird manuell eingestellt und ist daher mit einem systematischen Fehler behaftet. Wir nehmen einen Fehler von $\Delta x_d = 5\text{mm}$ an. Die Driftzeit t hat einen statistischen Fehler, da Labview zu jedem E/P -Wert 30 Driftzeiten aufnahm. Die Standardabweichung für jeden Messwert wurde direkt von Labview berechnet und findet sich im Messprotokoll. Es ist zweckmäßiger für die Driftgeschwindigkeit nur einen Gesamtfehler anzugeben. Der Gesamtfehler berechnet sich über eine Gaußsche Fehlerfortpflanzung aus dem systematischen Fehler der Driftstrecke und dem statistischen Fehler der Driftzeit.

$$\Delta^{ges} v_D = v_D \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta x_d}{x_d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t}\right)^2} \quad \text{mit } \Delta x_d = 5\text{mm} \quad \text{und } \sigma_t \text{ siehe Messprotokoll}$$

Das reduzierte Feld E/P kann aus der angelegten Spannung U der Feldstrecke d und dem Druck P berechnet werden.

$$\frac{E}{P} = \frac{U}{d \cdot P}$$

⁴<http://www.gnuplot.info/>

⁵<http://www.gnuplot.info/docs/node133.html>

⁶<http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~simonis/praktikum/allgemeines/script-Fehleranalyse.pdf>

Die Feldstrecke lässt sich aus den Angaben zum Versuchsaufbau im blauen Buch berechnen. Im Versuch wird das Feld von 40 ringförmigen Elektroden mit einer Dicke von 3mm erzeugt. Zwischen den Elektroden befinden sich Teflonringe mit einer Dicke von $(10 \pm 0,1)$ mm als Isolatoren.

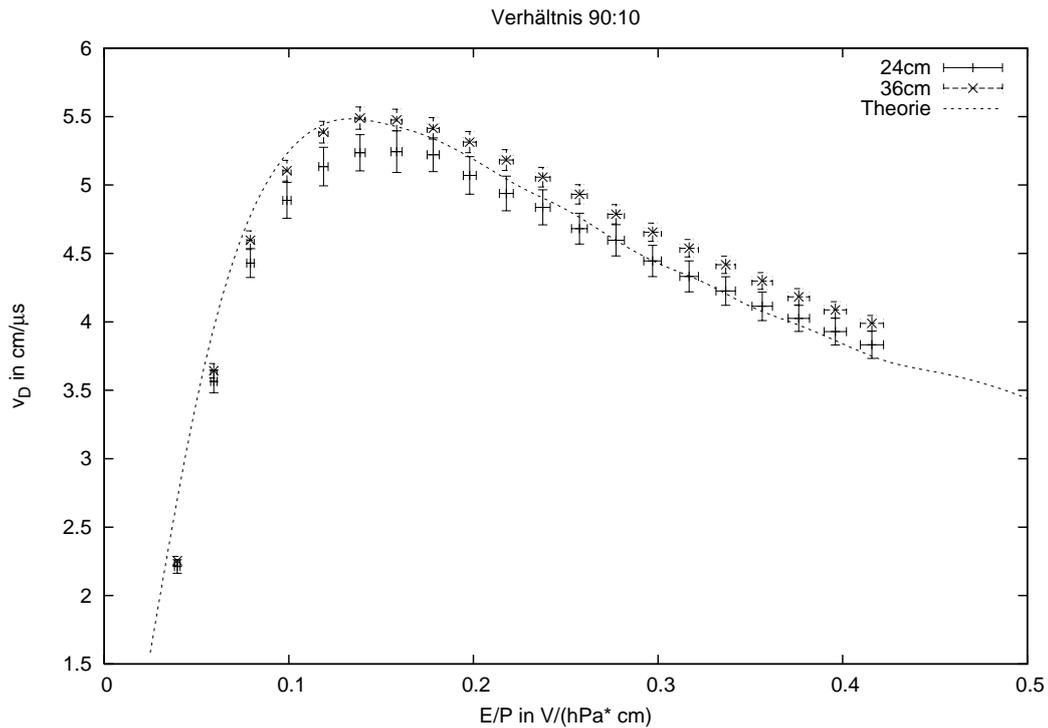
$$\Rightarrow d = (50,4 \pm 0,4)\text{cm}$$

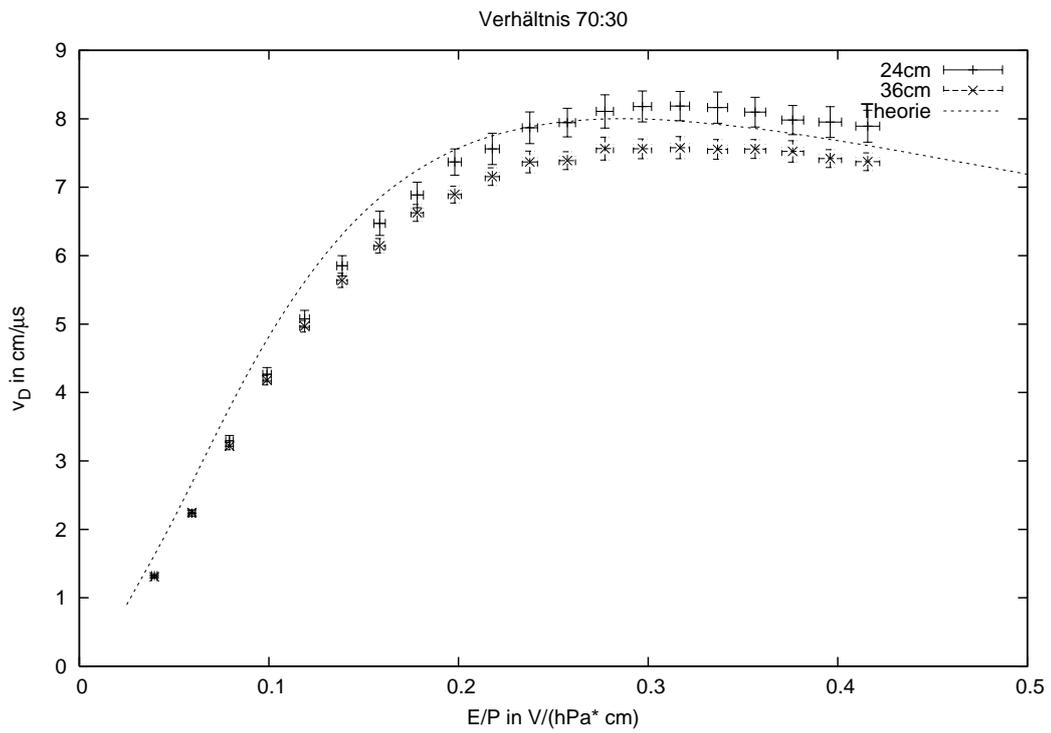
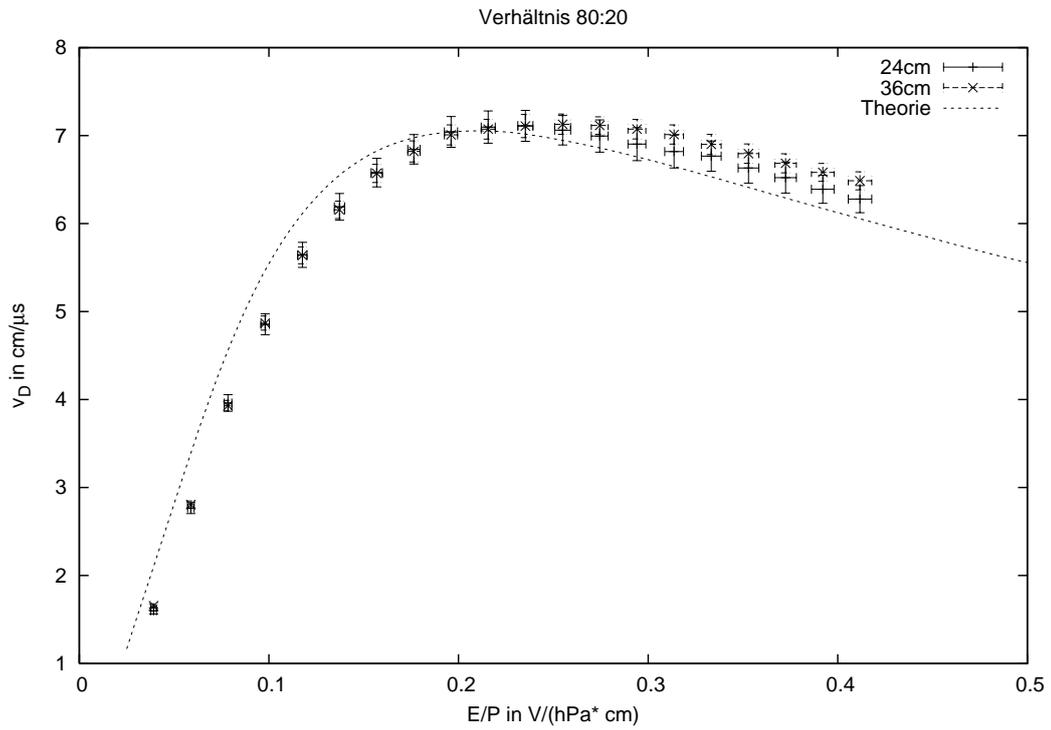
Für die Spannung nehmen wir einen Fehler von $\Delta U = 50V$ an. Für den Druck nehmen wir einen Fehler von $\Delta P = 5$ mbar an. Da alle Fehler systematische Fehler sind, verwenden wir die Größtfehlerabschätzung:

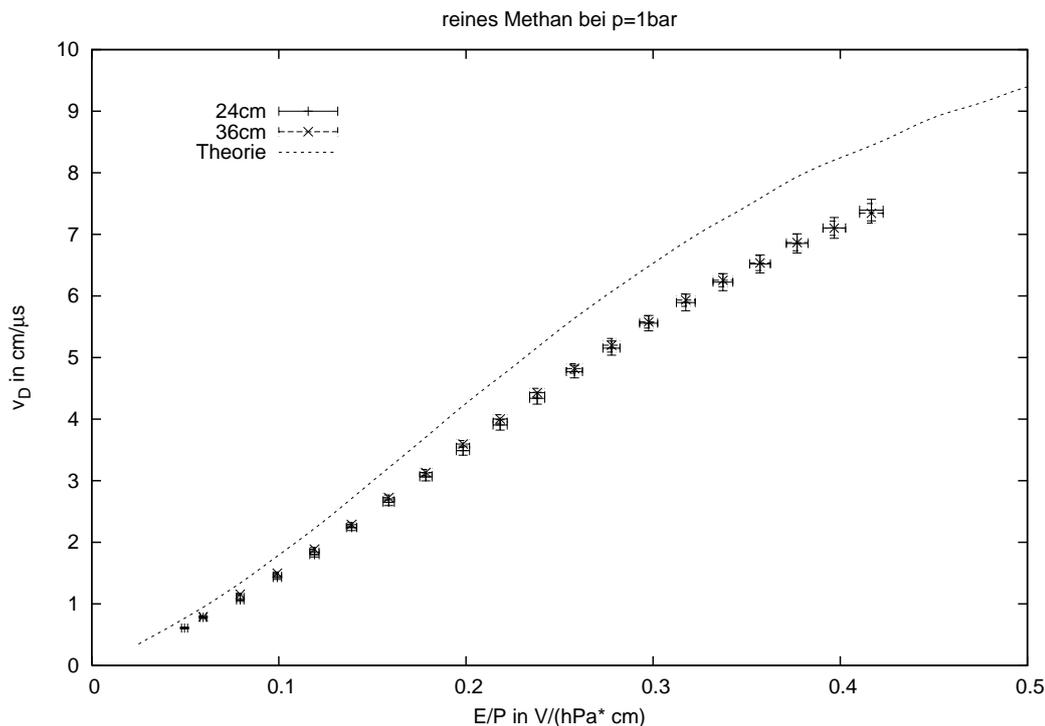
$$\frac{\Delta(E/P)}{E/P} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta P}{P}$$

11 Verschiedene Mischungsverhältnisse

Wir wählten die Mischungsverhältnisse (Argon:Methan) 90:10, 80:20, 70:30 und 0:100. In den folgenden Graphen ist für jedes Mischungsverhältnis jeweils die Driftgeschwindigkeit für beide Driftstrecken in Abhängigkeit des reduzierten Feldes aufgetragen. Außerdem ist noch die theoretische Kurve, die wir aus dem blauen Buch entnahmen, zum Vergleich aufgetragen. Es ergeben sich die folgenden Graphen:





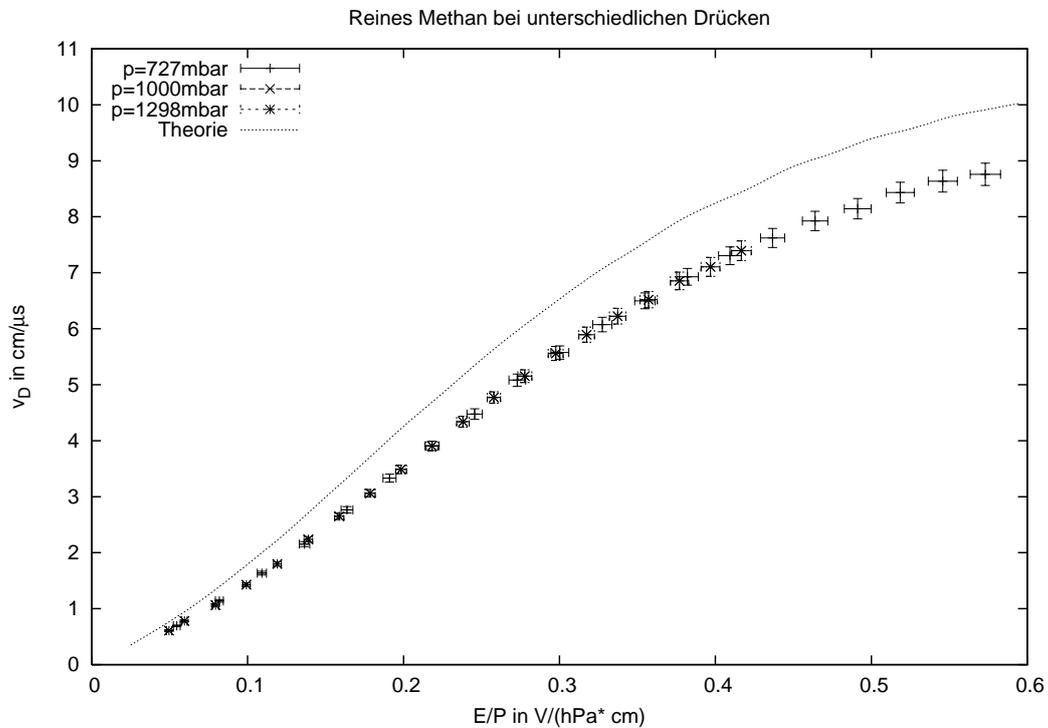


Der erwartete Verlauf ist gut zu erkennen. Wie in der Vorbereitung beschrieben erwarteten wir zunächst einen linearen Anstieg, da die Driftgeschwindigkeit klassisch betrachtet proportional zum reduzierten Feld ist. Aufgrund des quantenmechanischen Ramsauereffektes weist die Driftgeschwindigkeit jedoch ein Maximum auf. Dies lässt sich, wie bereits erläutert, dadurch erklären, dass für die Elektronen bei einer bestimmten Energie aufgrund quantenmechanischer Interferenzeffekte die Gasatome quasi durchsichtig werden. Die mittlere Stoßzeit vergrößert sich also und damit erreicht die Driftgeschwindigkeit ein Maximum. Bei hohen Elektronenenergien nimmt der Streuquerschnitt zu, so dass die Driftgeschwindigkeit wieder absinkt. Außerdem fällt auf, dass die Driftgeschwindigkeit vom Löschgasanteil abhängt. Je größer der Löschgasanteil, desto größer ist auch die Driftgeschwindigkeit. Dies lässt sich so erklären, dass die Elektronen mit dem Methan stoßen und dabei Energie abgeben, so dass sie in den Bereich des Ramsauerminimums von Argon kommen.

Vergleicht man unsere Messwerte mit den Theoriewerten so fällt auf, dass die Theoriewerte meist außerhalb der Fehlerbalken unserer Messwerte liegen, obwohl der qualitativ richtige Verlauf der Driftgeschwindigkeit wiedergegeben wird. Vor allem bei reinem Methan ist die Abweichung sehr stark. Dies legt die Vermutung nahe, dass wir bei der Fehlerbetrachtung systematische Fehler außer acht gelassen haben. So können zum Beispiel Verunreinigungen im Gas zu Abweichungen führen. Außerdem haben wir in der Fehlerrechnung nicht beachtet, wie genau wir die richtigen Mischungsverhältnisse hergestellt haben. Ebenso wird es – vor allem bei Methan – auch Abweichungen vom idealen Gasgesetz geben, wodurch Abweichungen bei den Mischungsverhältnissen entstehen.

12 Druckabhängigkeit

Im folgenden Graphen sind die Messungen für reines Methan bei verschiedenen Drücken aufgetragen.



Wie erwartet spielt es keine Rolle bei welchem Druck die Messung durchgeführt wird; sondern nur vom reduzierten Feld E/P . Da die Driftgeschwindigkeit nur vom reduzierten Feld E/P abhängt, erwarten wir für alle Drücke einen ähnlichen Kurvenverlauf. Diese Erwartung bestätigt das Experiment sehr gut, auch wenn die Kurve etwas vom theoretischen Verlauf abweicht.