

P3 Kernphysik

1. Juli 2009

Driftgeschwindigkeit

Gruppe 58 - Saskia Meißner, Arnold Seiler

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Versuchs	2
2	theoretische Grundlagen	2
2.1	Diffusion	2
2.2	Ramsauer-Effekt	2
2.3	Drift und Beweglichkeit	2
2.4	Zählgase und Quencher	3
2.4.1	Einfluss des Löschgasanteils auf die Driftgeschwindigkeit	3
3	experimenteller Aufbau	3
4	Durchführung des Versuchs	4
5	Auswertung	5
5.1	Driftgeschwindigkeit Argon-Methan-Mischungen	5
5.1.1	70:30 Mischung	5
5.1.2	90:10 Mischung	6
5.1.3	80:20 Mischung	7
5.2	Driftgeschwindigkeit Methan	9
5.2.1	$\frac{E}{p}$ Abhängigkeit	9
5.2.2	0:100 Mischung	9
5.3	Vergleich der Mischungen	10
5.4	Fehlerrechnung	10
5.4.1	Fehler des reduzierten Feldes $\frac{E}{p}$	10
5.4.2	Fehler der Driftgeschwindigkeit	10
5.4.3	Fehler der mittleren Driftgeschwindigkeit	10
5.4.4	Formeln	11
6	Anhang	11
6.1	Tabellen	11

1 Ziel des Versuchs

Durch die Messung von Driftgeschwindigkeiten der Elektronen in Gasen wie Argon sollen die Transporteigenschaften der Elektronen untersucht werden. Ein elektrisches Feld beschleunigt die Elektronen, während Stöße mit den Gasmolekülen sie abbremsen. Daher wirkt sich auch der Druck p des Gases auf die Driftgeschwindigkeit aus - misst man die Geschwindigkeit über dem reduzierten Feld $\frac{\vec{E}}{p}$ sollte diese Abhängigkeit heraus fallen. Bei hohen Feldstärken können die Elektronen so stark beschleunigt werden, dass sie weitere Gasatome ionisieren - es kommt zur Gasentladung. Da dieser Effekt nicht erwünscht ist, kann man durch kleine Beimischungen anderer, mehratomiger Gase wie Methan diese Schwelle erhöhen und höhere Driftgeschwindigkeiten ohne Gasentladung erreichen.

2 theoretische Grundlagen

2.1 Diffusion

Wir betrachten hier die Diffusion der Ladung im Raum. Mit einem Laser werden Atome im Gasgemisch ionisiert, so dass Elektronen frei werden. Die Ladungsverteilung diffundiert in den Raum wobei der Ladungsschwerpunkt erhalten bleibt. Die mittlere kinetische bzw. thermische Energie der Elektronen lässt sich mit Hilfe der Maxwell-Boltzmannverteilung $F(\epsilon)$ beschreiben:

$$\langle \epsilon \rangle = \int_0^\infty \epsilon \cdot F(\epsilon) d\epsilon = \int_0^\infty \epsilon \cdot \text{const} \cdot \sqrt{\epsilon} \cdot e^{-\frac{\epsilon}{k \cdot T}} \cdot d\epsilon = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$$

Die thermische Energie der Elektronen liegt bei Normalbedingungen um 40 meV . Die Ladungsverteilung zerfließt durch die Diffusion wie eine Gaußverteilung der Anzahldichte der Ladungsträger: $\frac{dN}{dx} = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi Dt}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$ mit der Diffusionskonstante $D = \frac{1}{3} \cdot \lambda \cdot v$, den Abstand zum Ursprung x , der Gesamtzahl von Ladungsträgern N_0 .

Die mittlere freie Weglänge λ hängt dabei von der Energie ab, da der Streuquerschnitt $\sigma(\epsilon)$ der Gasatome bezüglich der Elektronen von der Energie der Elektronen abhängt: $\lambda(\epsilon) = \frac{1}{N\sigma(\epsilon)}$ mit $N = \frac{N_L \cdot \rho}{A}$, der Loschmidtzahl N_L , der molaren Masse der Gasatome A und der Dichte ρ des Gases. Unter Normalbedingungen ist die Teilchenzahldichte für Edelgase $N = 2,69 \cdot 10^{19} \frac{\text{Moleküle}}{\text{cm}^3}$. Die Energieabhängigkeit der mittleren freien Weglänge wird aber erst bei Anlegen eines Feldes interessant, da sich dann auch die kinetische Energie der Elektronen ändert.

2.2 Ramsauer-Effekt

Je nach Energie der Elektronen ist der elastische Streuquerschnitt der Stöße zwischen Elektron und Edelgas viel kleiner als der erwartete gaskinetische Streuquerschnitt. Dies liegt daran, dass die Wellenlänge der Elektronen dann in der Größenordnung des Atomdurchmessers liegt und die Elektronen die Atome durch einen Interferenzeffekt quasi „übersehen“. Daher sinkt der Streuquerschnitt bei dieser Energie um einen Faktor 100 ab.

2.3 Drift und Beweglichkeit

Die folgenden Aussagen gelten sowohl für Elektronen als auch Ionen. Die Ionen sind wegen des höheren Streuquerschnitts und ihrer großen Masse (Trägheit) jedoch wesentlich langsamer als die Elektronen. Bei angelegtem \vec{E} -Feld gibt es eine Superposition von ungeordneter Diffusionsbewegung und geordneter Bewegung in oder gegen die Richtung der Feldlinien. Die Elektronen werden auf dem Weg zwischen zwei Stößen vom Feld beschleunigt, bis sie wieder mit einem Atom

stoßen. Dabei werden sie meist elastisch in irgend eine Richtung gestreut und von neuem Beschleunigt. Die Edelgase können bei den Stößen nur elektronisch angeregt werden, was dann bei höheren Feldstärken zu der Ionisierung weiterer Atome und schließlich zur Gasentladung führt. Mehratomige Gase können jedoch auch Energie „absorbieren“ und in innere Anregungsenergie wie Vibrations- und Schwingungsanregungen speichern.

Mit einem einfachen Modell kann man die mittlere Driftgeschwindigkeit, welche die Elektronen erreichen, abschätzen:

Auf der Strecke $v_D \cdot \tau$ findet im Mittel ein Stoß statt, daher finden auf der Strecke dx : $dn = \frac{1}{v_D \cdot \tau} \cdot dx$ Kollisionen statt. Die mittlere Zeit zwischen zwei Stößen ist dabei $\tau: \frac{1}{\tau} = N \cdot \sigma \cdot \omega$

- differentielle Wahrscheinlichkeit für Stoß in $[t, t + dt]$: $dP = \frac{1}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} dt$
- BGL zwischen zwei Stößen: $m \frac{dv}{dt} = e \cdot E$
- mittlere Driftgeschwindigkeit $\langle v_D \rangle = \frac{\langle x \rangle}{\tau} = \frac{e}{m} \cdot E \cdot \tau = \mu \cdot E$ für $T = const.$ ist $v_D \propto \frac{E}{p}$ oder $v_D \propto \frac{E}{N}$ (reduziertes \vec{E} -Feld $\frac{E}{p} [\frac{V}{cm \cdot hPa}]$ und $\frac{E}{N} [1Td = 10^{-17} Vcm^2]$). Bei $p = const.$ und $E = const.$ im Gleichgewicht sollte $v_D = const.$ sein ($\epsilon_E = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$)
- Gesamtenergie des Elektron: $\epsilon = \frac{m \cdot \omega^2}{2} = \epsilon_E + \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$ mit der momentanen Geschwindigkeit des Elektron ω

2.4 Zählgas und Quencher

- Zählgas: ein Gemisch aus einem einatomigen Edelgas (z.B. Argon) und einem mehratomigen organischen Gas (z.B. Methan CH_4). Das Edelgas dient auch zur Ladungsvervielfältigung.
- Quencher: auch Löschgas genannt ist ein organisches Gas. Es sollte möglichst unpolar sein. Das Gas absorbiert die Photonen aus dem Gasverstärkungsprozess.

2.4.1 Einfluss des Löschgasanteils auf die Driftgeschwindigkeit

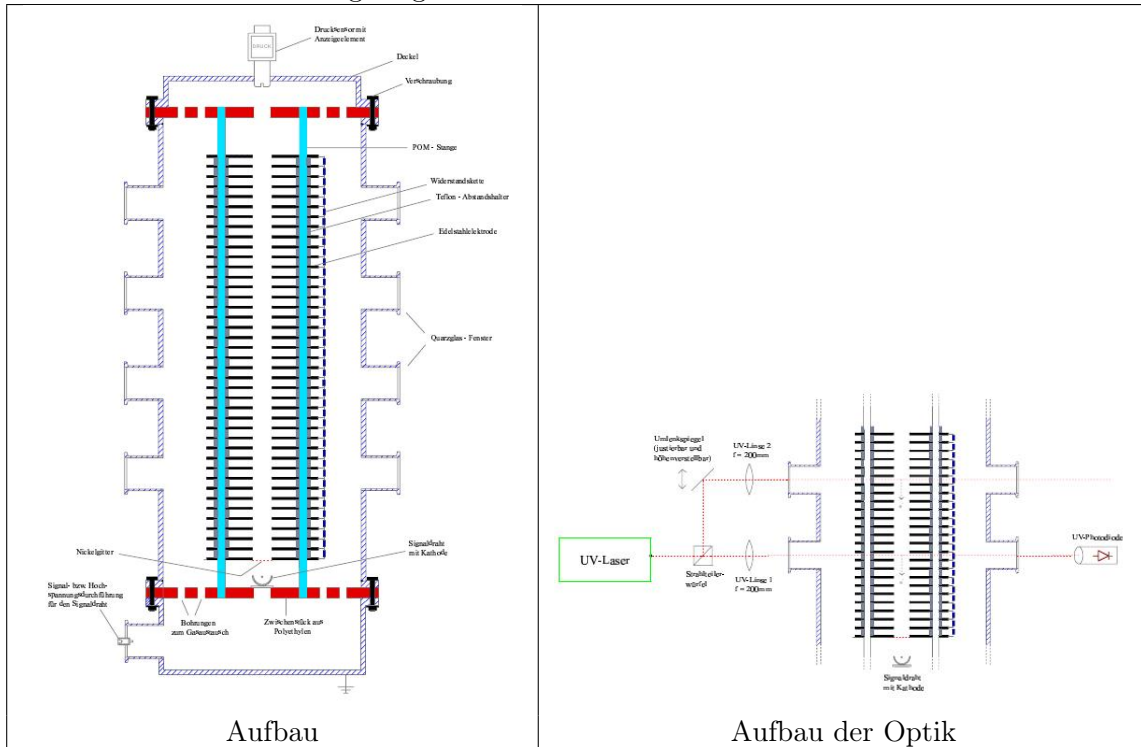
Bei größerem Löschgasanteil steigt die Driftgeschwindigkeit. Sie hängt auch von der Feldstärke ab.

- heißes Gas: Elektronenenergie vom \vec{E} -Feld dominiert $\epsilon \approx \epsilon_E \gg \frac{3}{2} k \cdot T$
- kaltes Gas: $\epsilon \approx \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$

3 experimenteller Aufbau

Es gibt eine Driftkammer, die mit einem Gasgemisch aus Argon und Methan gefüllt werden kann. Sie enthält 40 Platten (je 3 mm dick) dazwischen 39 Abstände (je $a = (1 \pm 0,01)cm$), die ein homogenes elektrisches Feld erzeugen. So lässt sich $\frac{E}{p} = \frac{U \cdot 1000}{(40 \cdot 0,3 + 39 \cdot a) \cdot p_{gemischt}}$ berechnen wobei U in $[kV]$ gemessen wird. Mit Hilfe eines gepulsten Lasers werden freie Ladungsträger durch Ionisation erzeugt. Durch anlegen einer Spannung U an die Platten in der Driftkammer erhält man ein homogenes Driftfeld. Bei konstanter Feldstärke sollte die Driftgeschwindigkeit bereits nach einer kurzen Strecke konstant sein und daher kein Unterschied zwischen den beiden Driftstrecken d_1 und d_2 erkennbar sein. Aus der effektiven Driftstrecke Δx lässt sich die Driftgeschwindigkeit $v_D = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ bestimmen. Die effektive Driftstrecke ist der Abstand zwischen den

beiden Strahlen des aufgeteilten Laserstrahls. Am Computer wird die mittlere Driftzeit Δt sowie die deren Standardabweichung aufgenommen.



¹ Links sind die Feldformenden Platten und der hellblaue Spannungsteiler erkennbar. Rechts ist erkennbar, wo der Laser durch die Kammer geht - dort werden Atome ionisiert.

4 Durchführung des Versuchs

Es werden folgende Messungen vorgenommen:

- Driftzeit von drei verschiedenen Argon-Methan-Mischungen (70:30), (90:10) und (80:20) auf beiden Driftstrecken.
- Berechnung der Mischungsverhältnisse: Man legt einen Druck $p_{gemisch}$ fest der zum Schluss in der Kammer herrscht. Bei bekanntem Verhältnis (A:M) berechnet man den partiellen Druck p_{Argon} von Argon und füllt mit Methan bis $p_{gemisch}$ auf. $p_{Argon} = \frac{p_{gemisch}}{1 + \frac{M}{A}}$
- $\frac{E}{p}$ - Abhängigkeit prüfen: Messung der Driftzeit von Methan bei verschiedenen Drücken.
- Variation von $\frac{E}{p}$ durch variieren der Beschleunigungsspannung U.
- 100 Laserpulse pro festem $\frac{E}{p}$ bzw. fester Beschleunigungsspannung U.

Einstellungen an der Apparatur:

Am Ende der Driftstrecke werden mit einem Zählrohr die Elektronen detektiert. Um mit dem Signal des Zählrohrs die Messung der Zeit triggern zu können, muss man die Anodenspannung so einstellen, dass das Signal über die Schwelle von -1V geht, das Rauschen jedoch nicht über diese Schwelle kommt. Für die verschiedenen Gasgemische ist diese Spannung unterschiedlich, bei Argon liegt sie um 2100V und bei Methan bis zu 3600V. Zur Beobachtung des Signals wird

¹Quelle: Diplomarbeit von Thomas Berghöfer, Institut für Kernphysik, Universität Karlsruhe

dieses auf einem Oszilloskop dargestellt und mit einer Photodiode auf den unteren Laserpuls getriggert.

Zur Messung der Driftzeit auf den Driftstrecken wird die Beschleunigungsspannung in 1kV Schritten von ca. 1kV bis 21kV eingestellt. Nicht bei allen Mischungen kann man bis 21kV messen, da vorher der Strom begrenzt wird um Gasentladung in der Kammer zu vermeiden. Wie erwartet steigt die maximal mögliche Spannung mit der Konzentration des Löschgases (Methan).

5 Auswertung

Vergleich der Messwerte mit den Literaturwerten aus der Tabelle in der Vorbereitungshilfe.

5.1 Driftgeschwindigkeit Argon-Methan-Mischungen

5.1.1 70:30 Mischung

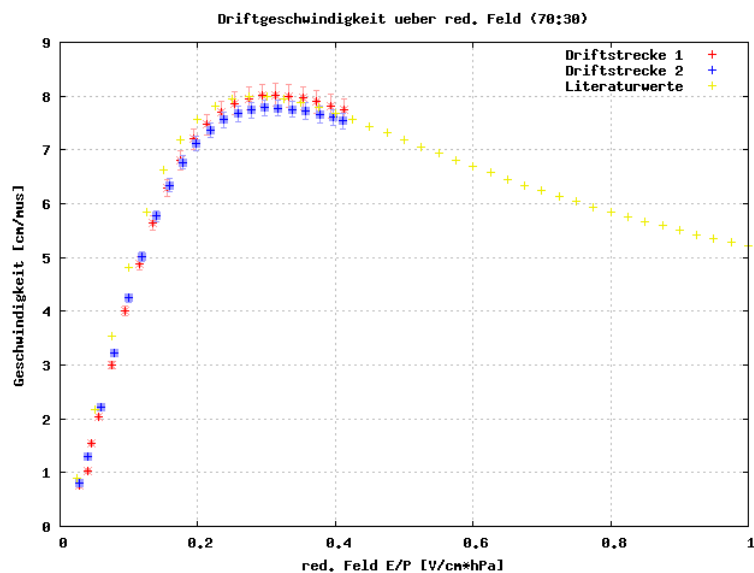


Abbildung 1:

Driftgeschwindigkeit auf beiden Driftstrecken. Das tatsächliche Verhältnis (Argon:Methan) ist hier $\frac{A}{M} = 2,4$ im Vergleich zu $\frac{70}{30} = 2,3$.

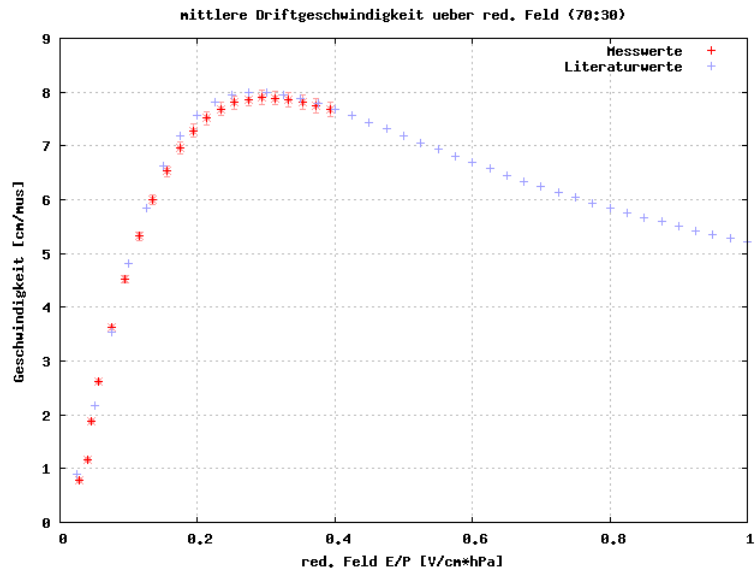


Abbildung 2:
Die Literaturwerte liegen trotz der leicht abweichenden Mischung im Fehlerbereich unserer Messwerte.

5.1.2 90:10 Mischung

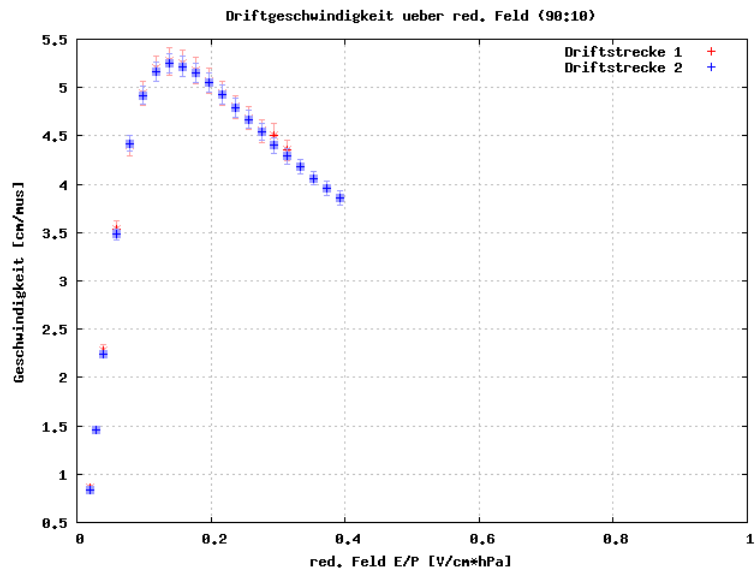


Abbildung 3:
Bei dieser Messung ist das Verhältnis $\frac{A}{M} = 8,9$ im Vergleich zu $\frac{90}{10} = 9$.

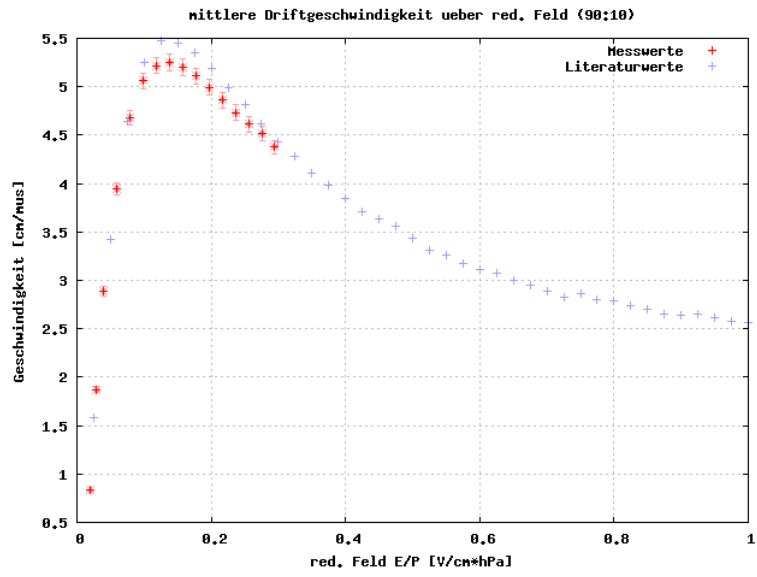


Abbildung 4:
Die Abweichung von den Literaturwerten ist größer als der Fehlerbereich der Messwerte.

5.1.3 80:20 Mischung

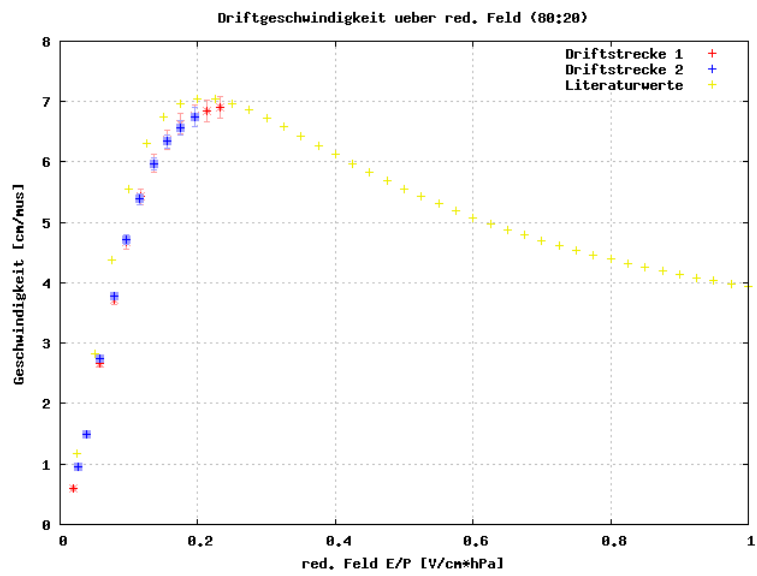


Abbildung 5:
Das Verhältnis ist $\frac{A}{M} = 4 = \frac{80}{20}$.

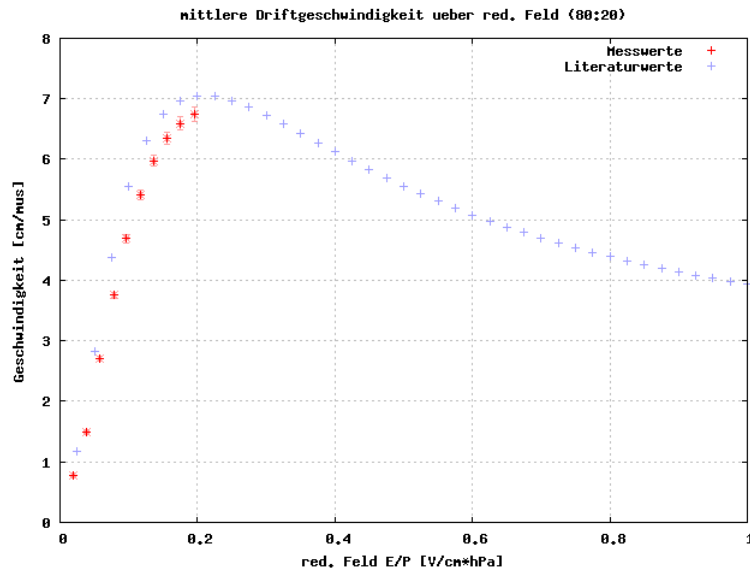


Abbildung 6:

Bei dieser Messreihe wurde der Strom recht bald begrenzt, deshalb sind es weniger Messwerte als bei den anderen Verhältnissen. Hier ist die Abweichung von den Literaturwerten so groß, dass sie nicht mehr im Bereich der Messfehler liegt.

Die Messreihe mit der 80:20 Mischung fällt etwas aus dem Rahmen, da sie nicht so recht zu den erwarteten Werten passt. Dies kann an unserer speziellen Methode zum Erreichen des Mischungsverhältnisses liegen. Die 90:10 Mischung wurde mit Methan aufgefüllt, bis 80:20 Mischung erreicht wurde. Dann haben wir von der Mischung abgesehen, bis der Enddruck von 1000hPa erreicht wurde.

Dabei kann sich jedoch das Mischungsverhältnis geändert haben, da Argon eine doppelt so hohe Viskosität besitzt wie Methan: $\eta_{Argon} = 22,8 \cdot 10^{-6} \frac{Ns}{m^2}$, $\eta_{Methan} = 11,2 \cdot 10^{-6} \frac{Ns}{m^2}$. Beim Ablassen strömt Methan schneller ab als Argon, die Mischung ist dann in Richtung Argon verschoben (z.B. 85:15 statt der gewünschten 80:20). Die niedrige Spannung, bei der bereits Gasentladung einsetzt, scheint dies zu bestätigen. Vergleicht man die verschiedenen Mischungen, scheint jedoch eher der Methananteil erhöht zu sein, da das Maximum zu höheren Feldstärken verschoben ist.

²Quelle: Datenblatt zu Argon und Methan, Messer Schweiz AG, CH-5600 Lenzburg, www.messer.ch

5.2 Driftgeschwindigkeit Methan

5.2.1 $\frac{E}{p}$ Abhängigkeit

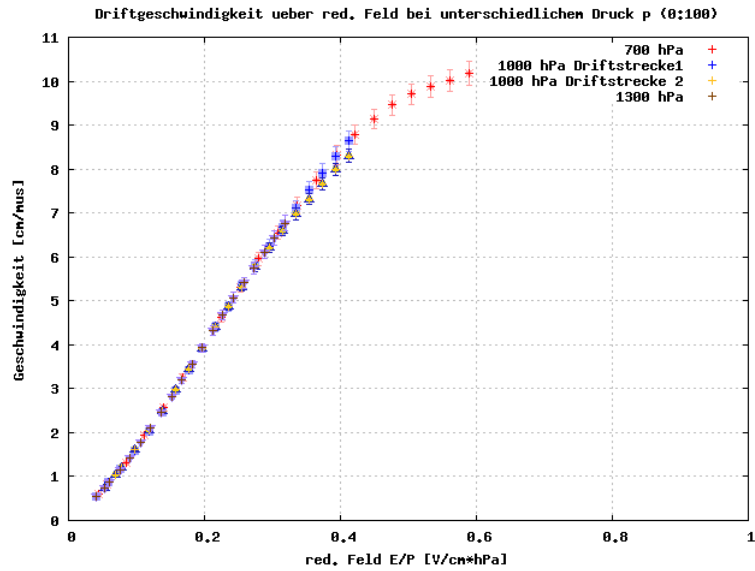


Abbildung 7:

Die Driftgeschwindigkeit ueber der reduzierten Feldstärke hängt nicht vom Druck in der Gaskammer ab.

5.2.2 0:100 Mischung

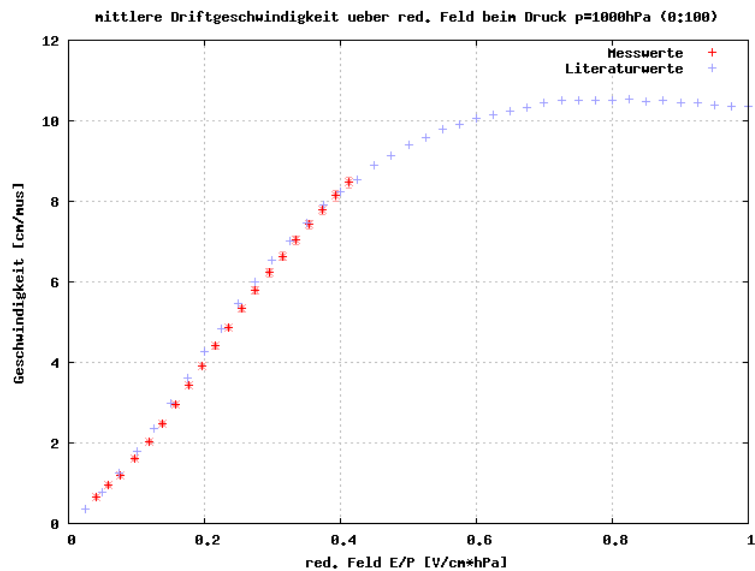


Abbildung 8:

Für Methan ist die mittlere Driftgeschwindigkeit in guter Übereinstimmung mit den Literaturwerten.

5.3 Vergleich der Mischungen

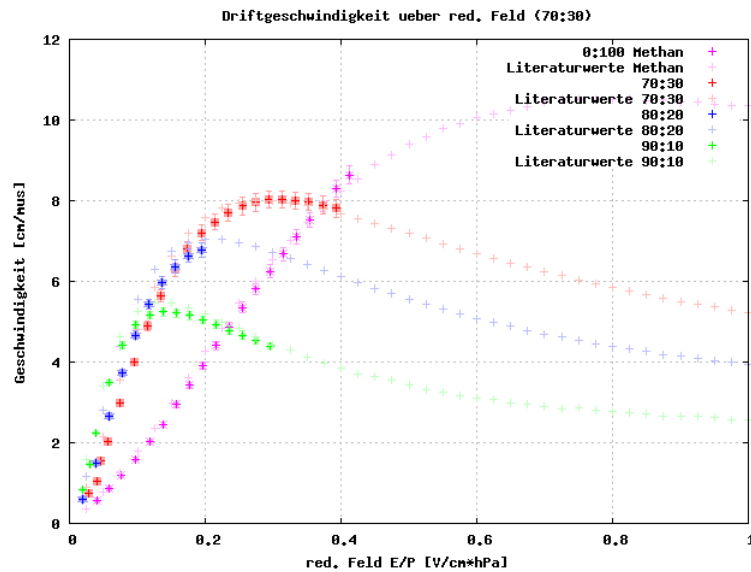


Abbildung 9:

Mit zunehmendem Methan-Anteil ist das Maximum der mittleren Driftgeschwindigkeit größer.

5.4 Fehlerrechnung

5.4.1 Fehler des reduzierten Feldes $\frac{E}{p}$

Das reduzierte \vec{E} -Feld hat einen systematischen Fehler. $\frac{E}{p} = \frac{U \cdot 1000}{(40 - 0,3 + 39 \cdot a) \cdot p_{\text{gemischt}}}$ und $\sigma_{\frac{E}{p}} = \sqrt{\sigma_U^2 \cdot \left(\frac{\partial \frac{E}{p}}{\partial U}\right)^2 + \sigma_{p_{\text{gemischt}}}^2 \cdot \left(\frac{\partial \frac{E}{p}}{\partial p_{\text{gemischt}}}\right)^2 + \sigma_a^2 \cdot \left(\frac{\partial \frac{E}{p}}{\partial a}\right)^2}$ mit dem Fehler der Beschleunigungsspannung $\sigma_U = 0,1$, des Gesamtdrucks in der Gaskammer $\sigma_{p_{\text{gemischt}}} = 1$ und der Fehler vom Abstand der Platten in der Kammer $\sigma_a = 0,01$. Der Fehler vom Abstand der Platten ist im Vergleich zu den anderen beiden Fehlern sehr klein, fast vernachlässigbar.

5.4.2 Fehler der Driftgeschwindigkeit

Die Driftgeschwindigkeit $v_D = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ hat sowohl einen statistischen als auch einen systematischen Fehler.

- statistischer Fehler: $\sigma_{v_D} = \frac{\sigma_t \cdot d}{\Delta t^2}$ mit der Driftstrecke d und der Standardabweichung der mittleren Driftzeit Δt .
- systematischer Fehler: $\sigma_{v_D} = \frac{\sigma_d}{\Delta t}$ mit dem Fehler der Driftstrecke σ_d (Breite des Laserstrahls)

5.4.3 Fehler der mittleren Driftgeschwindigkeit

Bildet man den Mittelwert von v_D auf den beiden Driftstrecken d_1 und d_2 , so hat dieser auch einen statistischen und systematischen Fehler. Mit $\bar{v}_D = \frac{1}{2} \cdot (v_{D_{d_1}} + v_{D_{d_2}})$ kann man Gaußsche Fehlerfortpflanzung für $\sigma_{\bar{v}_D}$ (stat. und syst.) verwenden.

5.4.4 Formeln

- Fehlerfortpflanzung einer Funktion (Gauß): $\sigma_{f(x,y,\dots)} = \sqrt{\sigma_x^2 \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \sigma_y^2 \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \dots}$
- statistischer Fehler (Poisson-Verteilung): $\sigma_x = \sqrt{x}$
- Standardabweichung vom Mittelwert (Abschätzung für systematischen Fehler):

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \text{ und } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- relativer Fehler von R: $\frac{\sigma_R}{R}$
- Notation:

(Wert \pm statistischer Fehler \pm systematischer Fehler) bzw. (Wert \pm statistischer Fehler)

6 Anhang

6.1 Tabellen

- Driftgeschwindigkeit (70:30) (Seite 1, 2)
- Driftgeschwindigkeit (90:10) (Seite 3, 4)
- Driftgeschwindigkeit (80:20) (Seite 5, 6)
- Methan (0:100) (Seite 7-10)