



Messung der Driftgeschwindigkeit von Elektronen in Gasen

Versuch Nr. 1
Ausarbeitung - 22. Oktober 2012

Ausgearbeitet von Martin Günther und Nils Braun

1 Durchführung und Rechnung

Im Versuch wurde wie in der Vorbereitung beschrieben die (als konstant angenommene) Driftgeschwindigkeit zweier Elektronenpakete in einer Argon-Methan-Mischung gemessen. Dazu wurden durch die beiden Ladungswolken in verschiedenem Abstand ein Zeitsignal ausgelöst. Die Messung wurde (bis auf Ausnahmefälle) 100 Mal wiederholt um einen Mittelwert zu bekommen. Es wurde sowohl das Mischungsverhältnis der beiden Gase, der Abstand sowie der Gesamtdruck variiert und jeweils für ungefähr einen Bereich von 0 bis 0.4 V/cm/mbar der reduzierten Feldstärke gemessen. Viele Messungen mussten wiederholt werden, um den statistischen Fehler gering zu halten. Vor allem bei höheren Drücken nahm die Anzahl falsch getriggelter Ereignisse zu und wir konnten nicht mehr 100 Messungen mit einem annehmbaren Fehler erreichen. So mussten wir die letzten fünf Messungen nur noch mit 20 bzw. 50 Wiederholungen ausführen. Aus den gemessenen Differenz-Zeiten t konnte über die Formel $v = \frac{d}{t}$ bei bekannter Driftstrecke d die Driftgeschwindigkeit v berechnet werden. Gleichzeitig wurden bei jeder Messung Druck P und Spannung U an den Elektroden notiert. Aus ihnen konnte über

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

die reduzierte Feldstärke E/P gewonnen werden. s ist dabei die Strecke der Elektroden und ist in der Vorbereitungshilfe als

$$s = (39 \text{ mm} \cdot 13 + 3 \text{ mm}) = 51 \text{ cm}$$

angegeben.

Als Fehlerquellen kommen bei dieser Messung infrage:

Driftstrecke Die Differenz der Driftstrecken wurde von uns über eine Messung des Laserabstandes auf beiden Seiten der Versuchseinrichtung (jeweils direkt beim Laser und gegenüberliegend) bestimmt. Dabei besitzt nicht nur die Messung eine Unsicherheit von ± 1 mm, sondern hat auch der Laserpunkt eine Ausdehnung von ± 2 mm auf beiden Seiten, sodass als systematischer Gesamtfehler für die Strecke

$$\sigma_s = 3 \text{ mm}$$

angenommen werden muss.

Spannung Die Spannung wurde bei jeder Einzelmessung zur Variation der reduzierten Feldstärke neu eingestellt. Aufgrund des Messgerätes müssen wir eine systematische Unsicherheit von

$$\sigma_U = 100 \text{ V}$$

für die Spannungsmessung annehmen.

Druck Der Druck und das Mischungsverhältnis wurde über ein Druckmessgerät am oberen Ende der Anlage bestimmt. Wir setzen einen systematischen Messfehler von

$$\sigma_p = 1 \text{ mbar}$$

für die Druckmessung an. Die hier präsentierten Mischungsverhältnisse sind natürlich nicht die genau eingestellten (außer das Mischungsverhältnis von 0:100 wurde kein Verhältnis genau getroffen). Da es aber beim Vergleich der verschiedenen

Verhältnisse nur um eine qualitative Analyse geht, sehen wir von diesem Fehler ab.

Zeit Die Zeit wurde von einer komplexen Messeinrichtung mit einem Analog-Digital-Wandler durch den PC gemessen. Wir setzen hier deshalb keinen systematischen Fehler an

$$\sigma_t = 0$$

Der statistische Fehler, der von der Software ausgegeben wurde, variierte für jede Messreihe von 100 Messungen und ist im angehängten Messprotokoll zu finden.

Aus den besprochenen Fehlerquellen lässt sich jetzt der Gesamtfehler der Messung berechnen. Dazu benutzen wir den Gaußschen Fehlerfortpflanzungssatz. Man erhält für den systematischen Fehler der Driftgeschwindigkeit:

$$\sigma_{v,\text{sys}} = \sigma_{s/t} = \left(\frac{\sigma_s}{s}\right) v$$

da die Zeit ja keinen systematischen Fehler besitzt. Der statistische Fehler ergibt sich jeweils aus dem statistischen Fehler der Zeit mit

$$\sigma_{v,\text{stat}} = \sqrt{\left(\frac{-s}{t^2}\right)^2 \sigma_{t,\text{stat}}^2} = \left(\frac{\sigma_{t,\text{stat}}}{t}\right) v$$

Die Summe ergibt den Gesamtfehler der Geschwindigkeit. Bei der ersten Messung mit einer Driftzeit von 27.926 μs und einem statistischen Fehler von 0.695 μs bei einer Driftstrecke von 23.25 cm erhält man z.B. einen Gesamtfehler von

$$\sigma_v = 0.031 \text{ cm}/\mu\text{s} \quad \text{bei } v = 0.833 \text{ cm}/\mu\text{s}$$

Analog berechnet man auch den systematischen Fehler für die reduzierte Feldstärke über

$$\sigma_{E/P}^2 = \left(\left(\frac{\sigma_P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2 \right) \left(\frac{E}{P}\right)^2$$

Bei der ersten Messung bei 1 V und einem Gesamtdruck von 1002 mbar erhält man

$$\sigma_{E/P} = 0.002 \text{ V/cm/mbar}$$

2 Driftgeschwindigkeit bei variiertem reduzierter Feldstärke

Nach den jeweiligen Vorbereitungen wie das Befüllen der Anlage mit dem richtigen Mischungsverhältnis der Gase und dem Konfigurieren der Messeinrichtung (die Spannung am Kathodendraht musste so eingestellt werden, dass sie zwar niedrig genug ist um keine Gasentladungen hervorzurufen aber hoch genug, um das Signal noch gut einfangen zu können) wurden für verschiedene Werte der Spannung die Driftzeit und damit die Driftgeschwindigkeit gemessen; jeweils für die Längen 23.25 und 34.625 cm. Die Ergebnisse sind in den Schaubildern Abb. 1 bis Abb. 4 zusammengefasst. Die schwarzen gestrichelten Linien beschreiben jeweils die theoretischen Werte wie sie z.B. im "Blauen Buch" zu finden sind.

Zuerst einmal ist bei allen Messungen wie es zu erwarten war eine gute Übereinstimmung zwischen den Messreihen bei verschiedenen Driftstrecken zu erkennen. Es lässt sich also vermuten, dass die Elektronenwolken wirklich eine im Mittel unbeschleunigte Bewegung ausführen und sich mit einer messbar konstanten Driftgeschwindigkeit fortbewegen. Die trotz-

dem auftretenden kleinen Abweichungen liegen alle in den dazugehörigen Fehlerbereichen und können deswegen vernachlässigt werden.

Bei der Mischung 90:10, bei der sich also viel Argon in der Messeinrichtung befand, ist im Bereich von ungefähr 0.1 V/cm/mbar reduzierter Feldstärke ein klares Maximum im Kurvenverlauf zu erkennen. Hier befindet sich das schon theoretisch vorhergesagte Ramsauermaximum, welches durch ein quantenphysikalisch zu erklärendes auftretendes Minimum im Streuquerschnitt bedingt ist. Bei noch höheren Feldstärken wird der Streuquerschnitt wieder größer und die Elektronen stoßen häufiger mit den Argonatomen. Die Driftgeschwindigkeit geht zurück. Mischt man jetzt mehr Methan hinzu - wie in Abb. 2 oder sogar 3 zu sehen - so stoßen die Elektronen häufiger mit diesem Methan. Sie verlieren deshalb an Energie und erreichen deshalb Energien über dem Ramsauerminimum nicht. Der Streuquerschnitt bleibt also klein und die Elektronen können nahezu ungestört fliegen. Die Driftgeschwindigkeit steigt nahezu linear mit der reduzierten Feldstärke - und die Driftgeschwindigkeit ist an ihrem Maximalwert fast doppelt so groß wie im Fall mit viel Argon. Das Ramsauermaximum wird im betrachteten Bereich nicht angenommen. Der Grenzfall tritt ein, wenn sich gar kein Argon mehr in der Kammer befindet. Bei der reinen Methanmischung steigt die Driftgeschwindigkeit wirklich linear mit der reduzierten Feldstärke (zumindest im betrachteten Bereich). Auch ist hier natürlich kein Ramsauermaximum zu sehen. Auffallend sind die sehr kleinen Fehler in dieser Messung. Der Grund liegt in der hohen Auffängerspannung, die nur hier möglich war, da

das Methan als Löschgas wirkt. Die hohe Spannung führte zu guten Messergebnissen und vor allem kleinen statistischen Fehlern, welche in den anderen Fällen hauptsächlich für den Fehler verantwortlich sind. Die Driftgeschwindigkeit scheint hier jetzt wieder kleiner zu sein, als bei den Mischungen davor. Betrachten man jedoch die theoretische Kurve (siehe z.B. "Blaues Buch"), so sieht man, dass die Kurve ihr Maximum bei größeren Feldstärken annimmt.

Insgesamt sind die zu sehenden Fehler fast vollständig durch die statistischen Fehler bestimmt. Gerade bei den großen Driftgeschwindigkeiten machen die Fehler prozentual mehr aus, da auch nur noch kleine Zeiten gemessen werden müssen. Die Werte stimmen jeweils sehr gut mit den theoretischen Überein. Die noch bleibenden Verschiebungen sind schwierig zu erklären, da wir nicht wissen, unter welcher Modellvorstellung die Werte erzeugt wurden.

In Abb. 5 sind schließlich alle Schaubilder bei kleiner Driftstrecke zusammengetragen. Die besprochenen Kurvencharakteristika sind noch einmal gut zu erkennen. Auch die steigende maximale Driftgeschwindigkeit je weniger Argon sich in der Mischung befindet ist gut zu erkennen.

3 Überprüfung der Proportionalität nach reduzierter Feldstärke

Die ganzen vorherigen Messungen wurden immer in Abhängigkeit der reduzierten Feldstärke E/P gemessen. Ob diese Abhängigkeit gerechtfertigt ist, versuchten wir in dieser Messung nachzuweisen. Dazu variierten wir den Gesamt-

druck einer reinen Methanmischung auf jeweils 691, 1002 und 1220 mbar. Durch Variation der Spannung konnten die reduzierten Feldstärken jeweils im gleichen Bereich von 0 bis ca. 0.4 V/cm/mbar gehalten werden. Wieder wurde die Driftgeschwindigkeit gemessen. Die Ergebnisse sind in Abb. 6 zu finden.

Vor allem im ersten Teil des Schaubildes bis ca. 0.25 V/cm/mbar liegen die Kurven wie es zu erwarten war sehr gut aufeinander. Die Driftgeschwindigkeit hängt also - wie auch theoretisch vorhergesagt - nicht nur vom Druck alleine, sondern vor allem von der reduzierten Feldstärke E/P ab. Bei höheren Feldstärkebereichen fächert der Graph etwas auf. Dies kann zwei Ursachen haben: Erstens sind (wie auch im Schaubild zu sehen) die Fehler in diesem Bereich weitaus größer geworden. Hauptsächlich bei 1220 mbar konnten nur noch sehr schwer gute Messergebnisse erhalten werden. Wir mussten die Messdauer auf 20 Wiederholungen

senken. Rechnet man die Fehler noch ein, so ist der Abstand zwischen den Kurven keineswegs groß. Zweitens können sich - vor allem bei hohen Drücken - nichtlineare Effekte bilden, welche aufgrund der großen Teilchenzahl entstehen. Diese könnten zu einer Verschiebung der Driftgeschwindigkeit führen.

Quellen

”Blaues Buch”
[wikipedia.de](https://de.wikipedia.org/)

Anhang

Im Folgenden sind die einzelnen Messwerte für die Driftgeschwindigkeiten der genannten Messungen aufgelistet. Die Fehler wurden dabei jeweils wie im Text beschrieben berechnet. Für die genauen Werte wie sie aus der Messung entstanden sind verweisen wir auf die angehängten Messprotokolle.

Vergleich der Driftgeschwindigkeit bei verschiedenen Längen
für ein Argon:Methan Mischungsverhältnis von 90:10

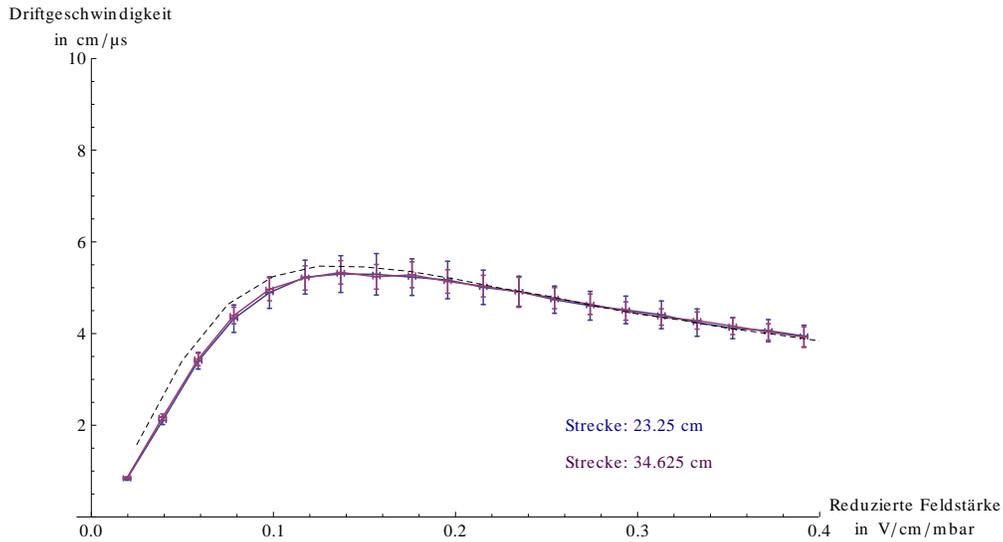


Abbildung 1: Driftgeschwindigkeiten für eine Mischung mit einem großen Anteil an Argon. Das Ramsauermaximum ist gut zu erkennen. Auch findet sich eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Messreihen und der theoretischen Kurve.

Vergleich der Driftgeschwindigkeit bei verschiedenen Längen
für ein Argon:Methan Mischungsverhältnis von 70:30

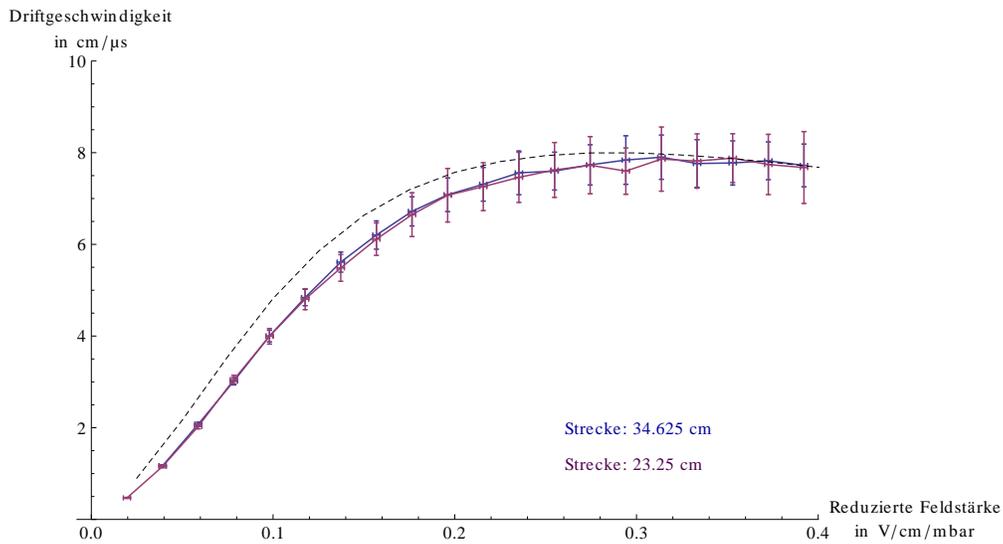


Abbildung 2: Driftgeschwindigkeiten für eine Mischung mit einem etwas kleineren Anteil an Argon. Das Ramsauermaximum ist nur noch schwer zu erkennen. Vor allem im vorderen Bereich ist die theoretische Kurve höher als die experimentellen Werte.

Vergleich der Driftgeschwindigkeit bei verschiedenen Längen
für ein Argon:Methan Mischungsverhältnis von 50:50

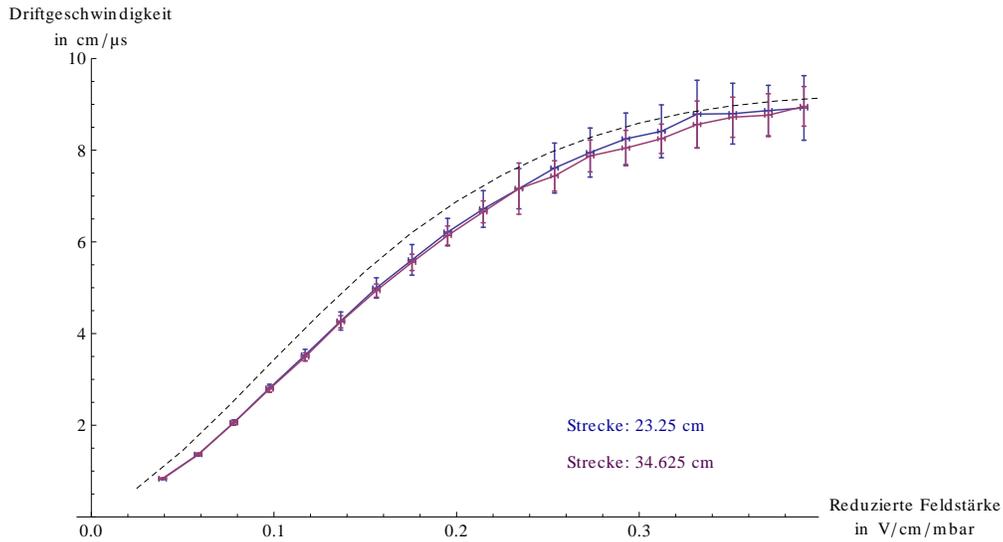


Abbildung 3: Driftgeschwindigkeiten für eine Mischung bei der genauso viel Argon wie Methan vorhanden ist. Die Kurve hat sich im Gegensatz zur Mischung mit viel Argon schon sehr geändert. Das Ramsauermaximum ist in diesem Bereich nicht mehr zu erkennen. Die Diskrepanzen zwischen den beiden Messreihen entstanden bei Messungen mit großen Fehlern.

Vergleich der Driftgeschwindigkeit bei verschiedenen Längen
für ein Argon:Methan Mischungsverhältnis von 0:100

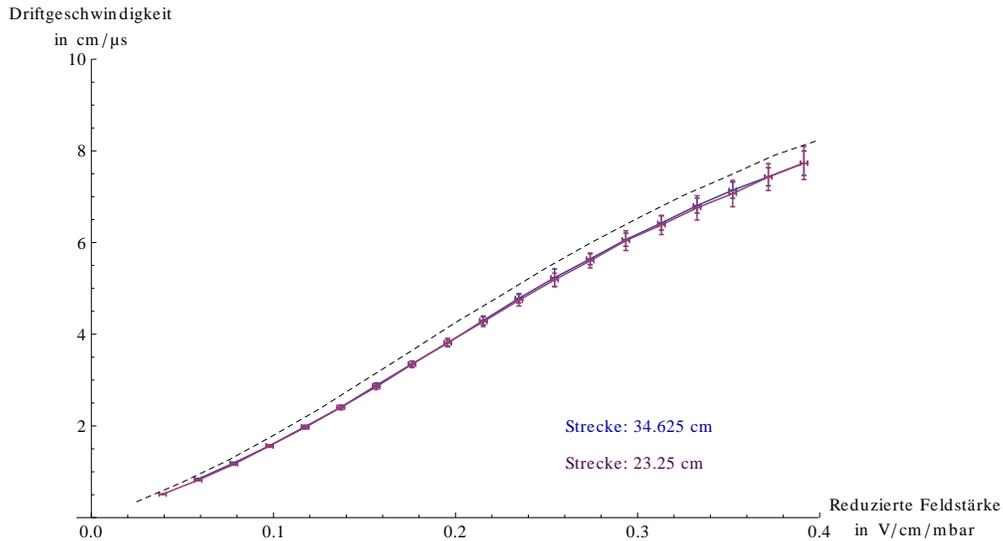


Abbildung 4: Driftgeschwindigkeiten für eine reine Methanmischung. Die Kurve zeigt wie zu erwarten gar kein Ramsauermaximum.

Vergleich der Driftgeschwindigkeit bei verschiedenen Argon:Methan-Mischungsverhältnissen

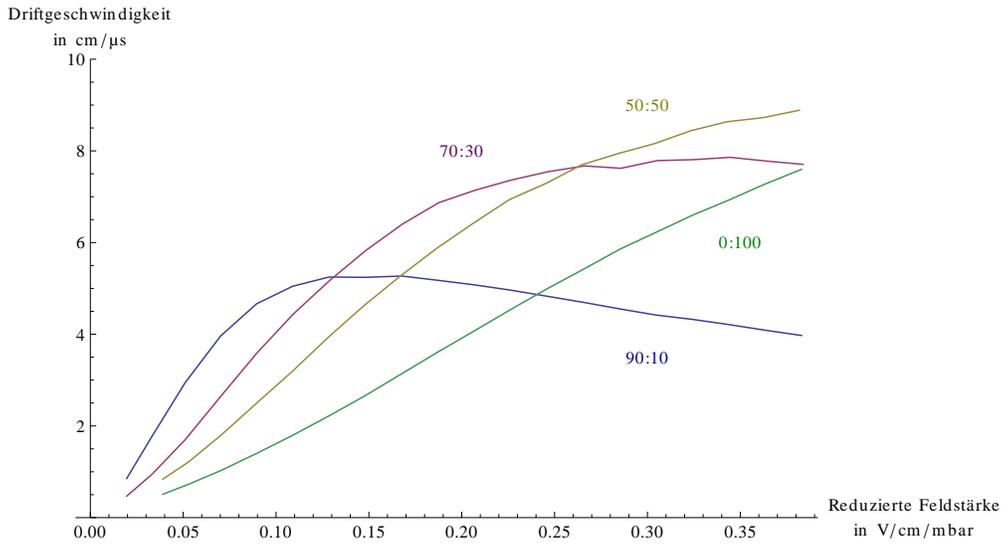


Abbildung 5: Vergleich der Driftgeschwindigkeiten für die verschiedenen besprochenen Mischungen. Schön zu sehen ist die Transformation der fast reinen "Argonkurve" bis hin zur "Methankurve".

Vergleich der Driftgeschwindigkeit von Methan bei verschiedenen Drücken

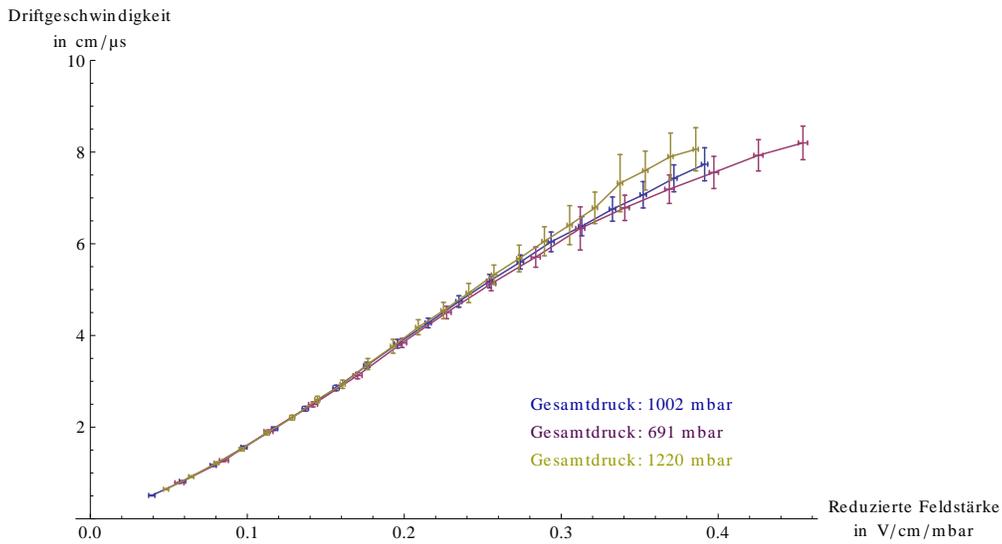


Abbildung 6: Vergleich der Driftgeschwindigkeit bei verschiedenen Gesamtdrücken aber gleichen reduzierten Feldstärken. Nimmt man zur Messkurve auch noch den Fehlerbereich dazu, so stimmen die Kurven gut überein.

Reduzierte Feldstärke	Drift- geschwindigkeit bei 23.25 cm cm/ μ s	Drift- geschwindigkeit bei 34.625 cm cm/ μ s	Fehler red. Feldstärke	Fehler 1. Drift- geschwindigkeit cm/ μ s	Fehler 2. Drift- geschwindigkeit cm/ μ s
V/cm/mbar	V/cm/mbar	V/cm/mbar	V/cm/mbar	V/cm/mbar	V/cm/mbar
0.020	0.833	0.853	0.002	0.031	0.021
0.039	2.103	2.174	0.002	0.087	0.072
0.059	3.399	3.445	0.002	0.174	0.146
0.078	4.325	4.395	0.002	0.299	0.183
0.098	4.894	4.966	0.002	0.343	0.251
0.117	5.231	5.213	0.002	0.370	0.265
0.137	5.299	5.334	0.002	0.400	0.256
0.157	5.293	5.238	0.002	0.453	0.269
0.176	5.231	5.282	0.002	0.398	0.282
0.196	5.169	5.136	0.002	0.408	0.257
0.215	5.009	5.035	0.002	0.374	0.235
0.235	4.913	4.912	0.002	0.338	0.314
0.254	4.739	4.772	0.002	0.296	0.229
0.274	4.607	4.639	0.002	0.313	0.222
0.294	4.515	4.491	0.002	0.300	0.200
0.313	4.408	4.361	0.002	0.302	0.179
0.333	4.239	4.284	0.002	0.298	0.187
0.352	4.118	4.163	0.002	0.229	0.184
0.372	4.063	4.036	0.002	0.242	0.177
0.391	3.946	3.924	0.002	0.236	0.224

Tabelle 1: Driftgeschwindigkeit bei einer Argon:Methan-Mischung mit einem Verhältnis von 90:10 und einem Gesamtdruck von 1002 mbar

Reduzierte Feldstärke $V/\text{cm}/\text{mbar}$	Drift- geschwindigkeit bei 34.625 cm $\text{cm}/\mu\text{s}$	Drift- geschwindigkeit bei 23.25 cm $\text{cm}/\mu\text{s}$	Fehler red. Feldstärke $V/\text{cm}/\text{mbar}$	Fehler 1. Drift- geschwindigkeit $\text{cm}/\mu\text{s}$	Fehler 2. Drift- geschwindigkeit $\text{cm}/\mu\text{s}$
0.039	1.171	0.469	0.002	0.022	0.010
0.059	2.076	1.156	0.002	0.044	0.028
0.078	3.016	2.028	0.002	0.081	0.052
0.098	4.001	3.051	0.002	0.128	0.093
0.118	4.841	3.995	0.002	0.179	0.170
0.137	5.613	4.804	0.002	0.219	0.229
0.157	6.203	5.486	0.002	0.308	0.291
0.176	6.719	6.114	0.002	0.318	0.354
0.196	7.082	6.649	0.002	0.367	0.477
0.216	7.309	7.071	0.002	0.367	0.584
0.235	7.560	7.259	0.002	0.477	0.522
0.255	7.598	7.461	0.002	0.413	0.546
0.275	7.734	7.623	0.002	0.438	0.598
0.294	7.839	7.727	0.002	0.529	0.624
0.314	7.902	7.598	0.002	0.483	0.505
0.333	7.763	7.860	0.002	0.520	0.699
0.353	7.776	7.818	0.002	0.481	0.592
0.373	7.823	7.881	0.002	0.412	0.532
0.392	7.722	7.742	0.002	0.466	0.657

Tabelle 2: Driftgeschwindigkeit bei einer Argon:Methan-Mischung mit einem Verhältnis von 70:30 und einem Gesamtdruck von 1000 mbar

Reduzierte Feldstärke $V/\text{cm}/\text{mbar}$	Drift- geschwindigkeit bei 23.25 cm $\text{cm}/\mu\text{s}$	Drift- geschwindigkeit bei 34.625 cm $\text{cm}/\mu\text{s}$	Fehler red. Feldstärke $V/\text{cm}/\text{mbar}$	Fehler 1. Drift- geschwindigkeit $\text{cm}/\mu\text{s}$	Fehler 2. Drift- geschwindigkeit $\text{cm}/\mu\text{s}$
0.039	0.829	0.839	0.002	0.016	0.012
0.059	1.360	1.366	0.002	0.031	0.020
0.078	2.059	2.054	0.002	0.056	0.041
0.098	2.808	2.789	0.002	0.084	0.064
0.117	3.531	3.489	0.002	0.124	0.089
0.137	4.274	4.257	0.002	0.197	0.133
0.156	4.995	4.937	0.002	0.221	0.143
0.176	5.608	5.553	0.002	0.333	0.178
0.195	6.213	6.138	0.002	0.299	0.208
0.215	6.718	6.655	0.002	0.399	0.238
0.234	7.160	7.161	0.002	0.439	0.558
0.254	7.610	7.438	0.002	0.544	0.331
0.273	7.949	7.875	0.002	0.535	0.348
0.293	8.248	8.047	0.002	0.563	0.386
0.312	8.412	8.250	0.002	0.577	0.319
0.332	8.787	8.560	0.002	0.738	0.512
0.351	8.797	8.719	0.002	0.663	0.438
0.371	8.864	8.764	0.002	0.550	0.466
0.390	8.922	8.956	0.002	0.704	0.432

Tabelle 3: Driftgeschwindigkeit bei einer Argon:Methan-Mischung mit einem Verhältnis von 50:50 und einem Gesamtdruck von 1005 mbar

Reduzierte Feldstärke $V/cm/mbar$	Drift- geschwindigkeit bei 34.625 cm $cm/\mu s$	Drift- geschwindigkeit bei 23.25 cm $cm/\mu s$	Fehler red. Feldstärke $V/cm/mbar$	Fehler 1. Drift- geschwindigkeit $cm/\mu s$	Fehler 2. Drift- geschwindigkeit $cm/\mu s$
0.059	0.842	0.510	0.002	0.011	0.008
0.078	1.192	0.818	0.002	0.016	0.014
0.098	1.568	1.165	0.002	0.022	0.021
0.117	1.985	1.562	0.002	0.030	0.027
0.137	2.407	1.967	0.002	0.039	0.037
0.157	2.884	2.403	0.002	0.052	0.051
0.176	3.354	2.854	0.002	0.057	0.060
0.196	3.807	3.344	0.002	0.069	0.073
0.215	4.300	3.819	0.002	0.097	0.094
0.235	4.783	4.272	0.002	0.101	0.105
0.254	5.235	4.741	0.002	0.190	0.125
0.274	5.642	5.186	0.002	0.126	0.147
0.294	6.063	5.601	0.002	0.144	0.153
0.313	6.426	6.042	0.002	0.155	0.215
0.333	6.807	6.384	0.002	0.162	0.209
0.352	7.142	6.757	0.002	0.175	0.264
0.372	7.435	7.069	0.002	0.197	0.287
0.391	7.732	7.428	0.002	0.266	0.293

Tabelle 4: Driftgeschwindigkeit bei einer reinen Methanmischung und einem Gesamtdruck von 1002 mbar

Reduzierte Feldstärke V/cm/mbar	Drift- geschwindigkeit bei 1002 mbar cm/ μ s	Drift- geschwindigkeit bei 691 mbar cm/ μ s	Drift- geschwindigkeit bei 1220 mbar cm/ μ s	Fehler red. Feldstärke V/cm/mbar	Fehler 1. Drift- geschwindigkeit cm/ μ s	Fehler 2. Drift- geschwindigkeit cm/ μ s	Fehler 3. Drift- geschwindigkeit cm/ μ s
0.039	0.510	0.786	0.645	0.002	0.008	0.014	0.011
0.059	0.818	1.271	0.920	0.002	0.014	0.022	0.017
0.078	1.165	1.905	1.218	0.002	0.021	0.035	0.025
0.098	1.562	2.496	1.517	0.002	0.027	0.055	0.035
0.117	1.967	3.125	1.877	0.002	0.037	0.071	0.050
0.137	2.403	3.837	2.208	0.002	0.051	0.099	0.055
0.157	2.854	4.501	2.603	0.002	0.060	0.136	0.071
0.176	3.344	5.129	2.936	0.002	0.073	0.153	0.091
0.196	3.819	5.710	3.376	0.002	0.094	0.221	0.121
0.215	4.272	6.335	3.764	0.002	0.105	0.470	0.151
0.235	4.741	6.784	4.179	0.002	0.125	0.276	0.164
0.254	5.186	7.191	4.544	0.002	0.147	0.311	0.179
0.274	5.601	7.556	4.927	0.002	0.153	0.350	0.209
0.294	6.042	7.930	5.324	0.002	0.215	0.340	0.211
0.313	6.384	8.201	5.679	0.002	0.209	0.366	0.290

Tabelle 5: Driftgeschwindigkeit bei einer reinen Methanmischung und verschiedenen Gasdrücken jeweils bei einer Driftstrecke von 23.25 cm