



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT
GÖTTINGEN

Physikalisches Praktikum

Versuch 9

Diffusion

Praktikanten: Magdalena Albrecht
Nikolai Wyderka
Datum: 02.05.2011
Gruppe: 8
Assistent: Steffen Bezold

Testiert:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theorie	3
2.1	BROWNSche Molekularbewegung	3
2.2	FICKSche Gesetze	3
3	Durchführung	4
3.1	Photowiderstand	4
3.2	WHEATSTONEsche Brückenschaltung	5
3.3	Erste Messung	5
3.4	Zweite Messung	6
4	Auswertung	6
4.1	Grafische Interpretation des Versuchs	6
4.2	Die Diffusionskonstante D	6
4.3	Auswertung der zweiten Messung	8
5	Diskussion	8
A	Anhang	9
A.1	Tabellen	9
A.1.1	Messwerte der Konzentration $\frac{c_0}{16}$	9
A.1.2	Die Messdaten der Konzentration $\frac{c_0}{32}$	12
A.1.3	Messung des Ortes in Abhängigkeit der Konzentration	13
A.2	Grafiken	14

1 Einleitung

Der Begriff Diffusion kommt von dem lateinischen Wort *diffundere*, was so viel wie „ausgießen, ausbreiten, zerstreuen“ bedeutet. In der Physik bedeutet Diffusion die spontane Durchmischung zweier Stoffe, ausgelöst durch die BROWNSche Molekularbewegung. Im vorliegenden Versuch wird die Diffusion der beiden Flüssigkeiten Methylenblau und Wasser ineinander untersucht. Dazu wird die Konzentration des Farbstoffes Methylenblau in Abhängigkeit von Ort und Zeit gemessen.

2 Theorie

2.1 BROWNSche Molekularbewegung

Ursache der Diffusion sind die von ROBERT BROWN entdeckten Bewegungen kleiner Moleküle, die durch die thermische Energie induziert werden. Durch Kollisionen untereinander erfahren sie eine Kraft, die bewirkt, dass sich die Bewegungsrichtung fortwährend ändert, so dass die Bahn chaotisch verläuft. Die Teilchen können sich dadurch langsam durch die Substanz bewegen, obwohl diese selbst in Ruhe ist. Das bewirkt, dass sich lokal unterschiedliche Konzentrationen einer Substanz mit der Zeit durch den sogenannten Diffusionsstrom angleichen.¹

2.2 FICKSche Gesetze

Um den Ausgleichprozess quantitativ zu beschreiben, betrachtet man zunächst die Stromdichte des Diffusionsstromes $\vec{j}(\vec{x})$. Bezeichnet $n(\vec{x})$ die Teilchendichte am Ort \vec{x} , so wird der Strom an diesem Punkt durch das 1. FICKSche Gesetz beschrieben:

$$\vec{j}(\vec{x}) = -D\vec{\nabla}n(\vec{x}),$$

wobei D die sogenannte Diffusionskonstante ist.

Strömen dadurch allerdings mehr Teilchen aus einem Teilvolumen heraus als in es hinein, muss die Teilchenzahldichte abnehmen, da ansonsten Teilchen aus dem Nichts entstünden:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\vec{\nabla}\vec{j}(\vec{x}).$$

Durch Einsetzen erhält man das 2. FICKSche Gesetz oder, auch allgemeine Diffusionsgleichung genannt:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D\Delta n.$$

¹Vgl. MESCHÉDE, DIETER: *Gerthsen Physik*, Berlin 2006

Dies ist eine partielle Differentialgleichung, deren Lösung man im Eindimensionalen mit dem Anfangswertproblem $c(x, t = 0) = \begin{cases} c_0 & x \leq 0 \\ 0 & x > 0 \end{cases}$ durch einen harmonischen Ansatz aus einer Fourier-Transformation erhält:

$$c(x, t) = \frac{c_0}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right) \quad (1)$$

mit der GAUSSschen Fehlerfunktion

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2) dy.$$

Letztere Funktion ist sigmoid und punktsymmetrisch zum Ursprung mit den Grenzwerten $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \operatorname{erf}(x) = \pm 1$. Abbildung 1 zeigt den Verlauf der Fehlerfunktion.

Die Funktion aus Gleichung (1) hingegen zeigt für $t = 0$ die Eigenschaften der HEAVISIDE-Funktion mit scharfer Kante bei $x = 0$; bei $x < 0$ liegt die Anfangskonzentration vor, bei $x > 0$ beträgt die Konzentration dagegen 0. Je größer nun t , desto flacher wird die Kurve, die scharfe Kante verschwindet. Für $t \rightarrow \infty$ nähert sie sich $\frac{c_0}{2}$ an, was einem kompletten Konzentrationsausgleich entspricht. Abbildung 2 zeigt den Verlauf der Funktion für verschiedene Zeitpunkte.

Da die Fehlerfunktion stetig und bijektiv auf dem Bildbereich $[-1; 1]$ ist, kann man Gleichung (1) nach x^2 umformen und erhält damit das Quadrat des Weges in Abhängigkeit von der Zeit t für eine feste Konzentration c :

$$x^2 = 4Dt \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c}{c_0} \right)^2. \quad (2)$$

3 Durchführung

In einer Glasküvette werden die beiden Flüssigkeiten Wasser und Methylenblau überschichtet. Nun wird die Konzentration des Farbstoffes über die Absorption des Lichts einer Quecksilberdampfampe gemessen. Dazu wird ein Photowiderstand und eine WHEATSTONEsche Brückenschaltung verwendet.

3.1 Photowiderstand

Ein Photowiderstand besteht aus einem Halbleiter, in dem zunächst nur wenige freie Elektronen zum Ladungstransport zur Verfügung stehen. Der elektrische Widerstand

ist also hoch. Wird dieser Halbleiter nun mit ausreichend energiereichem Licht bestrahlt, so werden weitere Elektronen in das Leiterband gehoben und der Widerstand sinkt. Je größer die Intensität des Lichtes, desto geringer ist also der Widerstand.²

3.2 WHEATSTONEsche Brückenschaltung

Zur möglichst genauen Bestimmung des Wertes des Photowiderstandes wird eine WHEATSTONEsche Brückenschaltung verwendet. Der Vorteil dieser Methode gegenüber der direkten Messung ist, dass es hierbei zu keiner Verfälschung der Werte durch die Innenwiderstände des Messgerätes kommt.

Wie in Abbildung 3 gezeigt, besteht diese aus dem zu bestimmenden Widerstand R_{ph} , einem weiteren konstanten Widerstand R und einem Potentiometer mit zwei gegeneinander variierbaren Widerständen R_1 und R_2 . Zur Messung wird nun das Potentiometer so eingestellt, dass zwischen den Punkten A und B kein Strom fließt. Es besteht also keine Potentialdifferenz zwischen diesen beiden Punkten, sodass an den Widerständen R und R_1 , sowie C und R_2 jeweils die gleiche Spannung abfällt:

$$R \cdot I_1 = R_1 \cdot I_2$$

$$R_{ph} \cdot I_1 = R_2 \cdot I_2.$$

Daraus lässt sich nun der gesuchte Widerstand R_{ph} berechnen:

$$R_{ph} = R \cdot \frac{R_2}{R_1}.$$

3.3 Erste Messung

Zunächst wird mithilfe einer Linse der Strahl der Quecksilberdampfampe auf den Photowiderstand fokussiert. Danach wird ein $\frac{c_0}{16}$ -Graufilter in die höhenverstellbare Halterung eingesetzt und die Messbrücke darauf abgeglichen. Anschließend wird statt des Filters die Küvette in den Strahlengang gebracht, die zu $\frac{3}{4}$ mit Wasser gefüllt ist, über das Methylenblaulösung der Konzentration c_0 geschichtet ist. Eine halbe Stunde lang wird nun alle 30 Sekunden der Ort der Konzentration $\frac{c_0}{16}$ gemessen, indem die Höhe der Küvette so verstellt wird, dass der Strom der Messbrücke bei 0 A bleibt. Tabelle 1 zeigt den gemessenen Ort der Konzentration $\frac{c_0}{16}$ in Abhängigkeit der Zeit.

Mit einer zweiten Küvette wird die Messung für die Konzentration $\frac{c_0}{32}$ wiederholt, die Messwerte sind in Tabelle 2 aufgeführt.

²Vgl. DOBRINSKI, PAUL et al.: *Physik für Ingenieure*, Stuttgart 1988

3.4 Zweite Messung

Nach etwa 40 Minuten wird für die zweite Küvette bei als konstant angenommener Zeit mit Hilfe der Graufilter der Ort der Konzentrationen $\frac{c_0}{2}, \frac{c_0}{4}, \frac{c_0}{8}, \frac{c_0}{16}$ und $\frac{c_0}{32}$ bestimmt. Anschließend werden weitere fünf Messwerte in umgekehrter Reihenfolge aufgenommen. 95 Minuten nachdem die erste Küvette präpariert wurde, wird die Messung für diese wiederholt.

4 Auswertung

4.1 Grafische Interpretation des Versuchs

Bei der ersten Messung wird der Punkt einer festen Konzentration beobachtet. Dies entspricht auf Abbildung 2 den Schnittpunkten der Ortskurven der Höhe $\frac{c_0}{16}$ bzw. $\frac{c_0}{32}$ mit den entsprechenden Verteilungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Dieser Schnittpunkt entfernt sich mit zunehmender Zeit immer weiter von der ursprünglichen Grenzschicht der beiden Flüssigkeiten bei $x = 0$.

In der zweiten Messung wird durch die Festlegung der Zeit eine der Kurven ausgewählt und die Punkte x_c der Konzentration c bestimmt. Sie sind in Abbildung 2 als Schnittpunkte der Kurve $\sqrt{4Dt} = 10 \text{ mm}$ mit den jeweiligen Konzentrationsgeraden dargestellt.

4.2 Die Diffusionskonstante D

Nach Gleichung (2) ist ein linearer Zusammenhang zwischen dem Wegquadrat und der Zeit zu erwarten. Da zwar die Skaleneinteilung der Mikrometerschraube eine Genauigkeit der Einstellung von $10 \mu\text{m}$ zuließ, aber der Bereich, in dem das Ampèremeter aufgrund dessen grober Skaleneinteilung keinen Strom zeigte, mit etwa $50 \mu\text{m}$ deutlich größer war, wird auch bei der Messung des Weges h von dem Fehler $\sigma_h = 50 \mu\text{m}$ ausgegangen.

Da der Startpunkt der Messung nicht bei $x = 0$ liegt, erhält man $x(h)$ durch das Abziehen des Startwerts h_0 . Es ergeben sich für die $\frac{c_0}{16}$ -Messung $x_1(h) = h - 1310 \mu\text{m}$ und für die $\frac{c_0}{32}$ -Messung $x_2(h) = h - 550 \mu\text{m}$. Die umgerechneten Werte finden sich ebenfalls in Tabellen 1 und 2.

Man erhält für den Fehler σ_{x^2} des Wegquadrats

$$\sigma_{x^2} = \sqrt{\sigma_x^2 \left(\frac{\partial x^2}{\partial x} \right)^2} = 2\sigma_x x.$$

So erhält man die in Tabelle 1 und 2 gegebenen Werte für x^2 mit entsprechendem Fehler. Abbildungen 4 und 5 zeigen die umgerechneten Messwerte mit Fehler und

Linearer Regression. Aus ihr erhält man die Steigung m der Geraden, die sich aus Gleichung (2) zu

$$m = 4D \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c}{c_0} \right)^2$$

ergibt. Für die Messwerte der Konzentrationen $c = c_1 = \frac{c_0}{16}$ bzw. $c = c_2 = \frac{c_0}{32}$ erhält man durch die Regression die Steigungen $m_1 = 2000 \mu\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ bzw. $m_2 = 3230 \mu\text{m}^2 \text{s}^{-1}$. Der Fehler der bestimmten Steigung ergibt sich zu

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}}{\left(\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}\right) \cdot \left(\sum_i \frac{t_i^2}{\sigma_i^2}\right) - \left(\sum_i \frac{t_i}{\sigma_i}\right)^2}},$$

woraus sich $\sigma_{m_1} \approx \sigma_{m_2} \approx 30 \mu\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ergeben.

Die Diffusionskonstante D kann nun durch Umstellen bestimmt werden:

$$D = \frac{m}{4 \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c}{c_0} \right)^2}$$

mit

$$\sigma_D = \sqrt{\sigma_m^2 \left(\frac{\partial D}{\partial m} \right)^2} = \frac{\sigma_m}{4 \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c}{c_0} \right)^2}.$$

Der konstante Term $\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c}{c_0} \right)^2$ lässt sich für die Konzentrationen $c = \frac{c_0}{16}$ und $c = \frac{c_0}{32}$ mithilfe eines CAS³ bestimmen:

c	$\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c}{c_0} \right)^2$
$\frac{c_0}{16}$	1.176762922
$\frac{c_0}{32}$	1.734885005

Schließlich lassen sich die Diffusionskonstanten und deren gewichteter Mittelwert berechnen:

D_1	$=$	$(425 \pm 7) \mu\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$=$	$(4.25 \pm 0.07) \cdot 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$
D_2	$=$	$(465 \pm 5) \mu\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$=$	$(4.65 \pm 0.05) \cdot 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$
D	$=$	$(451 \pm 5) \mu\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$=$	$(4.51 \pm 0.05) \cdot 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$

³Beispielsweise mit Wolfram Alpha: <http://www.wolframalpha.com/input/?i=erf%5E-1%281-1%2F8%29%5E2>

4.3 Auswertung der zweiten Messung

Für die Werte der zweiten Messung, die in Tabelle 3 zu finden sind, wird nun die Konzentration gegen den Ort aufgetragen, wobei die Zeit jeweils als konstant angesehen wird. Hierzu wird zunächst wieder $x(h)$ benötigt. Die Konzentration $\frac{c_0}{2}$ muss dabei bei $x = 0$ liegen. Daher wird als h_0 der Mittelwert der beiden Messwerte für diese Konzentration gewählt. Man ermittelt $h_{0,2} = 900 \mu\text{m}$ für Küvette 2 und $h_{0,1} = 2190 \mu\text{m}$ für Küvette 1. Daraus ergeben sich die angepassten x -Werte in Tabelle 3. Der Fehler σ_x beträgt dabei weiterhin $\sigma_x = 50 \mu\text{m}$.

Man erhält für die Zeit t_\downarrow bzw. t_\uparrow für die Messung absteigender bzw. aufsteigender Konzentrationen den Mittelwert der jeweils ersten und letzten Messzeitpunkte. Daraus ergeben sich für Küvette 2 die Zeiten $t_{2,\downarrow} = (2240 \pm 140) \text{ s}$ und $t_{2,\uparrow} = (2520 \pm 150) \text{ s}$; für Küvette 1 $t_{1,\downarrow} = (5020 \pm 110) \text{ s}$ und $t_{1,\uparrow} = (5240 \pm 120) \text{ s}$.

Abbildungen 6 und 7 zeigen die gemessenen Punkte zusammen mit dem aus den berechneten Zeiten zu Beginn und am Ende der Messungen ermittelten theoretischen Kurvenverlauf für die Küvetten 2 und 1. Dieser ergibt sich aus Gleichung (1):

$$\hat{c} = \frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right).$$

Der Fehler des Ortes entspricht in den Abbildungen dem Durchmesser der Punkte.

Anhand der Graphen sieht man bereits, dass der Fehler durch die Dauer der Messung und der währenddessen voranschreitenden Diffusion sehr klein ist im Vergleich zu den Abweichungen der gemessenen Punkte zu der theoretischen Vorhersage. Der Fehler der Konzentration durch den Fehler der Zeit σ_t beträgt, vernachlässigt man den Fehler der Diffusionskonstanten und den des Ortes,

$$\sigma_{\hat{c}} = \sqrt{\sigma_t^2 \left(\frac{\partial \hat{c}}{\partial t} \right)^2} = \frac{\sigma_t}{2} \cdot \frac{4Dx \exp \left(-\frac{x^2}{4Dt} \right)}{\sqrt{\pi (4Dt)^3}}.$$

Mit den Intervallbreiten der Messungen als σ_t erhält man einen maximalen Fehler von $\sigma_{\hat{c}} = 0.01$. Das entspricht wieder dem Durchmesser der Punkte im Diagramm und ist im Vergleich zur im Diagramm deutlich sichtbaren Abweichung vernachlässigbar klein. Die Fehler, die durch den Orts- und Diffusionskonstantenfehler entstehen, liegen in der gleichen Größenordnung.

5 Diskussion

Die Diffusionskonstante, die aus dem ersten Versuchsteil ermittelt wurde, liegt in dem erwarteten Bereich. Allerdings erkennt man an der Regression, dass vor allem im Anfangs- und Endbereich kaum von einem linearen Zusammenhang gesprochen

werden kann. Hinzu kommen bei der Messung der zweiten Küvette deutliche Sprünge in den Messwerten, zum Teil sogar mehrfach hintereinander auftauchende gleiche Werte.

Auch bei der zweiten Messung gibt es sehr starke Abweichungen zu den theoretisch erwarteten Werten.

Die wohl größte Fehlerquelle im Versuch war die fehlende Verdunklung des Raumes. So machte sich das wechselhafte Wetter durch abwechselnd Sonnenschein und Bewölkung deutlich während des Versuchs bemerkbar. Die Schaltung mit dem Fotowiderstand, der zur Verfolgung einer bestimmten Konzentration genutzt wurde, wurde zu Beginn der Messung geeicht. Durch den unterschiedlich starken Lichteinfall des Umgebungslichts änderte sich der Fotowiderstand auch bei konstanter Konzentration deutlich. Am stärksten waren diese Einflüsse beim Messen der zweiten Küvette.

Eine weitere Fehlerquelle rührt aus der bereits zu Beginn vorhandenen Verschmutzung der Küvette durch vorherige Versuche. Teilweise waren noch eingetrocknete Methylenblaureste vorhanden, die sich beim Kontakt mit Wasser lösten und so für eine inhomogene Konzentrationsverteilung sorgten. Außerdem war die durchsichtige Küvette von außen zerkratzt, wodurch zusätzlich die Werte beeinträchtigt wurden.

A Anhang

A.1 Tabellen

A.1.1 Messwerte der Konzentration $\frac{c_0}{16}$

t [s]	h [μm]	x [μm]	x^2 [μm^2]
90	1460	150	22500 ± 15000
120	1500	190	36100 ± 19000
150	1560	250	62500 ± 25000
180	1615	305	93025 ± 30500
210	1660	350	122500 ± 35000
240	1710	400	160000 ± 40000
270	1760	450	202500 ± 45000
300	1800	490	240100 ± 49000
330	1850	540	291600 ± 54000
360	1890	580	336400 ± 58000
390	1935	625	390625 ± 62500
420	1970	660	435600 ± 66000
450	2010	700	490000 ± 70000

t [s]	h [μm]	x [μm]	x^2 [μm^2]
480	2055	745	555025 ± 74500
510	2090	780	608400 ± 78000
540	2120	810	656100 ± 81000
570	2160	850	722500 ± 85000
600	2200	890	792100 ± 89000
630	2225	915	837225 ± 91500
660	2260	950	902500 ± 95000
690	2300	990	980100 ± 99000
720	2330	1020	1040400 ± 102000
750	2365	1055	1113025 ± 105500
780	2395	1085	1177225 ± 108500
810	2430	1120	1254400 ± 112000
840	2460	1150	1322500 ± 115000
870	2490	1180	1392400 ± 118000
900	2520	1210	1464100 ± 121000
930	2550	1240	1537600 ± 124000
960	2580	1270	1612900 ± 127000
990	2610	1300	1690000 ± 130000
1020	2630	1320	1742400 ± 132000
1050	2665	1355	1836025 ± 135500
1080	2685	1375	1890625 ± 137500
1110	2710	1400	1960000 ± 140000
1140	2740	1430	2044900 ± 143000
1170	2765	1455	2117025 ± 145500
1200	2785	1475	2175625 ± 147500
1230	2810	1500	2250000 ± 150000
1260	2840	1530	2340900 ± 153000
1290	2865	1555	2418025 ± 155500
1320	2890	1580	2496400 ± 158000
1350	2920	1610	2592100 ± 161000
1380	2945	1635	2673225 ± 163500
1410	2980	1670	2788900 ± 167000
1440	3000	1690	2856100 ± 169000
1470	3020	1710	2924100 ± 171000
1500	3050	1740	3027600 ± 174000
1530	3070	1760	3097600 ± 176000
1560	3090	1780	3168400 ± 178000
1590	3115	1805	3258025 ± 180500

t [s]	h [μm]	x [μm]	x^2 [μm^2]
1620	3140	1830	3348900 ± 183000
1650	3160	1850	3422500 ± 185000
1680	3180	1870	3496900 ± 187000
1710	3200	1890	3572100 ± 189000
1740	3220	1910	3648100 ± 191000
1770	3240	1930	3724900 ± 193000
1800	3265	1955	3822025 ± 195500

A.1.2 Die Messdaten der Konzentration $\frac{c_0}{32}$

t [s]	h [μm]	x [μm]	x^2 [μm^2]
0	550	0	0
30	645	95	9025 ± 9500
60	740	190	36100 ± 19000
90	805	255	65025 ± 25500
120	885	335	112225 ± 33500
150	950	400	160000 ± 40000
180	1000	450	202500 ± 45000
210	1050	500	250000 ± 50000
240	1100	550	302500 ± 55000
270	1160	610	372100 ± 61000
300	1245	695	483025 ± 69500
330	1255	705	497025 ± 70500
360	1295	745	555025 ± 74500
390	1330	780	608400 ± 78000
420	1350	800	640000 ± 80000
450	1450	900	810000 ± 90000
480	1465	915	837225 ± 91500
510	1600	1050	1102500 ± 105000
540	1665	1115	1243225 ± 111500
570	1735	1185	1404225 ± 118500
600	1770	1220	1488400 ± 122000
630	1825	1275	1625625 ± 127500
660	1855	1305	1703025 ± 130500
690	1905	1355	1836025 ± 135500
720	1945	1395	1946025 ± 139500
750	2000	1450	2102500 ± 145000
780	2025	1475	2175625 ± 147500
810	2060	1510	2280100 ± 151000
840	2110	1560	2433600 ± 156000
870	2160	1610	2592100 ± 161000
900	2200	1650	2722500 ± 165000
930	2240	1690	2856100 ± 169000
960	2285	1735	3010225 ± 173500
990	2310	1760	3097600 ± 176000
1020	2340	1790	3204100 ± 179000
1050	2380	1830	3348900 ± 183000

t [s]	h [μm]	x [μm]	x^2 [μm^2]
1080	2410	1860	3459600 ± 186000
1110	2435	1885	3553225 ± 188500
1140	2470	1920	3686400 ± 192000
1170	2510	1960	3841600 ± 196000
1200	2530	1980	3920400 ± 198000
1230	2565	2015	4060225 ± 201500
1260	2610	2060	4243600 ± 206000
1290	2640	2090	4368100 ± 209000
1320	2655	2105	4431025 ± 210500
1350	2700	2150	4622500 ± 215000
1380	2720	2170	4708900 ± 217000
1410	2750	2200	4840000 ± 220000
1440	2785	2235	4995225 ± 223500
1470	2810	2260	5107600 ± 226000
1500	2840	2290	5244100 ± 229000
1530	2840	2290	5244100 ± 229000
1560	2875	2325	5405625 ± 232500
1590	2930	2380	5664400 ± 238000
1620	2955	2405	5784025 ± 240500
1650	2975	2425	5880625 ± 242500
1680	2995	2445	5978025 ± 244500
1710	3025	2475	6125625 ± 247500
1740	3060	2510	6300100 ± 251000
1770	3145	2595	6734025 ± 259500
1800	3190	2640	6969600 ± 264000

A.1.3 Messung des Ortes in Abhängigkeit der Konzentration

Konzentration	Küvette 2				Küvette 1			
	$t_{2,\downarrow}$ [s]	$x_{2,\downarrow}$ [μm]	$t_{2,\uparrow}$ [s]	$x_{2,\uparrow}$ [μm]	$t_{1,\downarrow}$ [s]	$x_{1,\downarrow}$ [μm]	$t_{1,\uparrow}$ [s]	$x_{1,\uparrow}$ [μm]
$\frac{c_0}{2}$	2100	-80	2660	75	4915	200	5355	-200
$\frac{c_0}{4}$	2200	1520	2590	1550	5000	2910	5310	2780
$\frac{c_0}{8}$	2275	2710	2550	2100	5050	3610	5235	3710
$\frac{c_0}{16}$	2325	3255	2490	2415	5090	4130	5185	4210
$\frac{c_0}{32}$	2375	5530	2375	5530	5130	6110	5130	6110

A.2 Grafiken

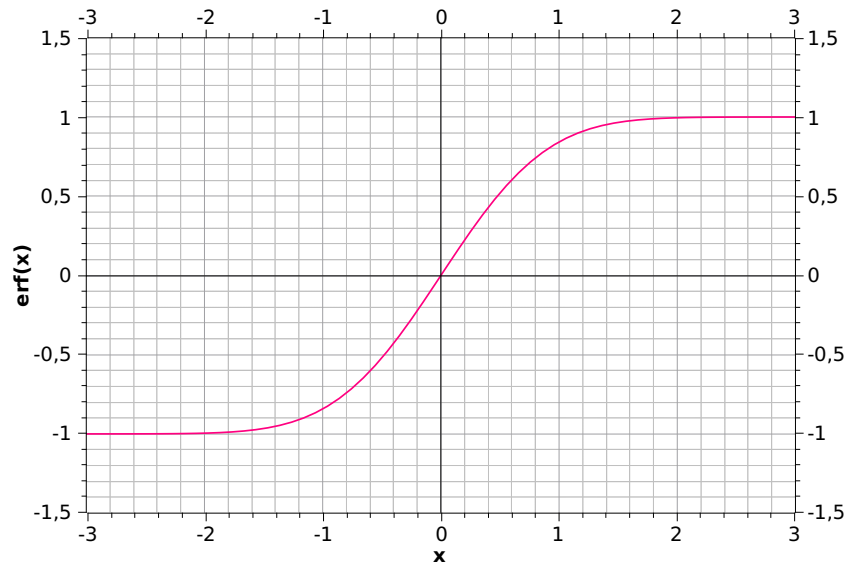


Abbildung 1: Verlauf der Fehlerfunktion

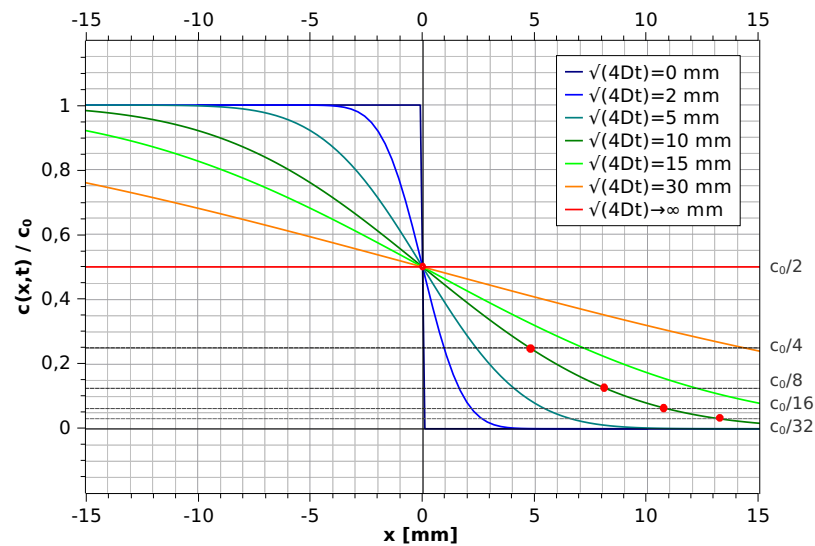


Abbildung 2: Spezifische Konzentrationsverteilung zu verschiedenen Zeitpunkten und Schnitte mit einigen Konzentrationswerten

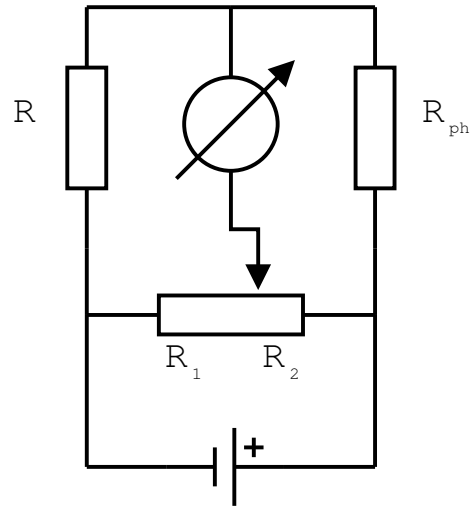
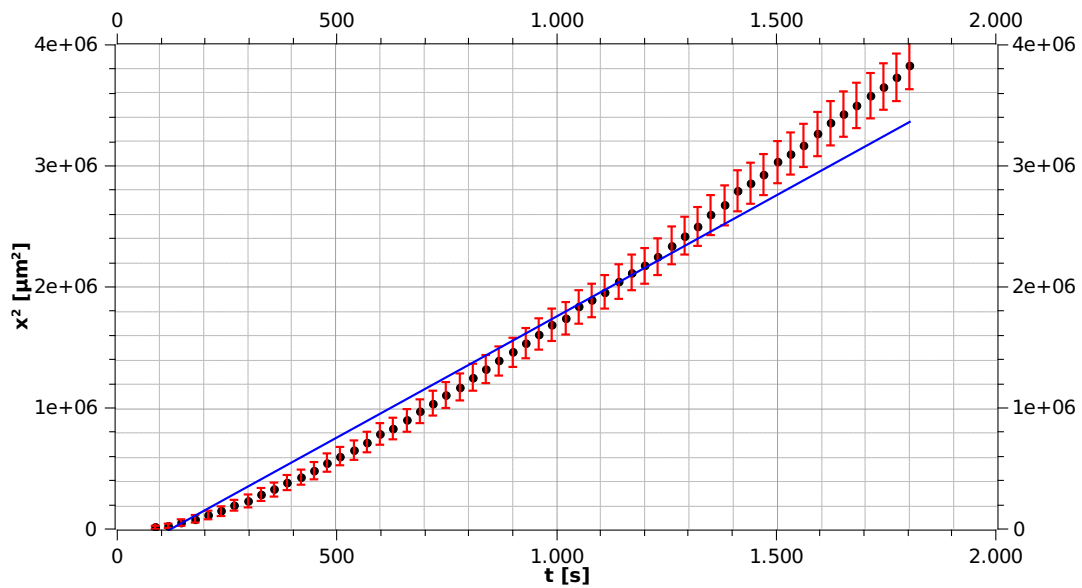


Abbildung 3: Aufbau der WHEATSTONEsche Brückenschaltung

Abbildung 4: Messung des Ortes der Konzentration $\frac{c_0}{16}$ mit Linearer Regression

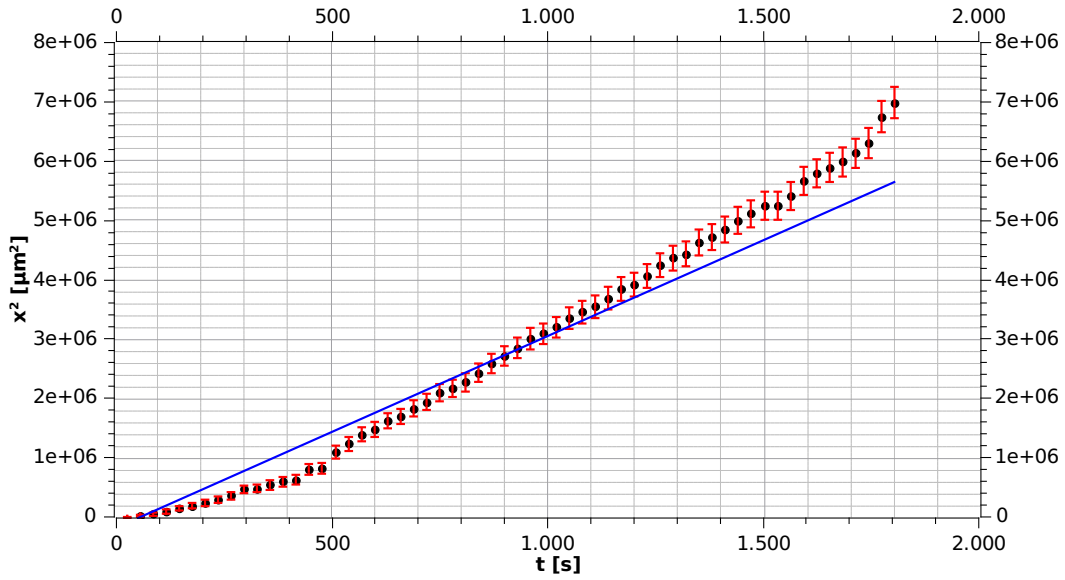


Abbildung 5: Messung des Ortes der Konzentration $\frac{c_0}{32}$ mit Linearer Regression

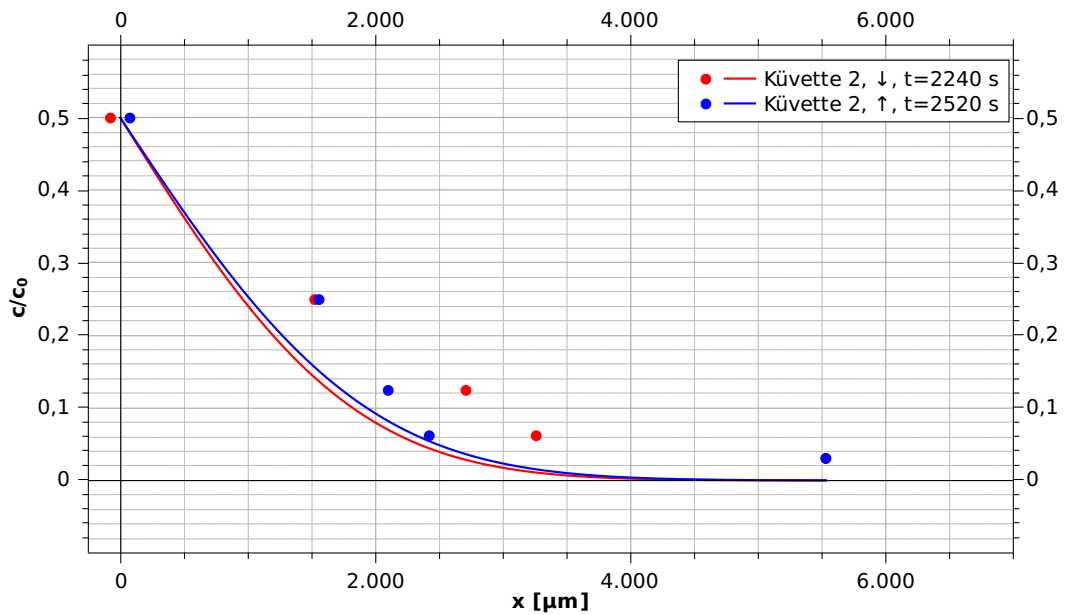


Abbildung 6: Konzentration in Abhängigkeit des Ortes und theoretischer Verlauf für Küvette 2

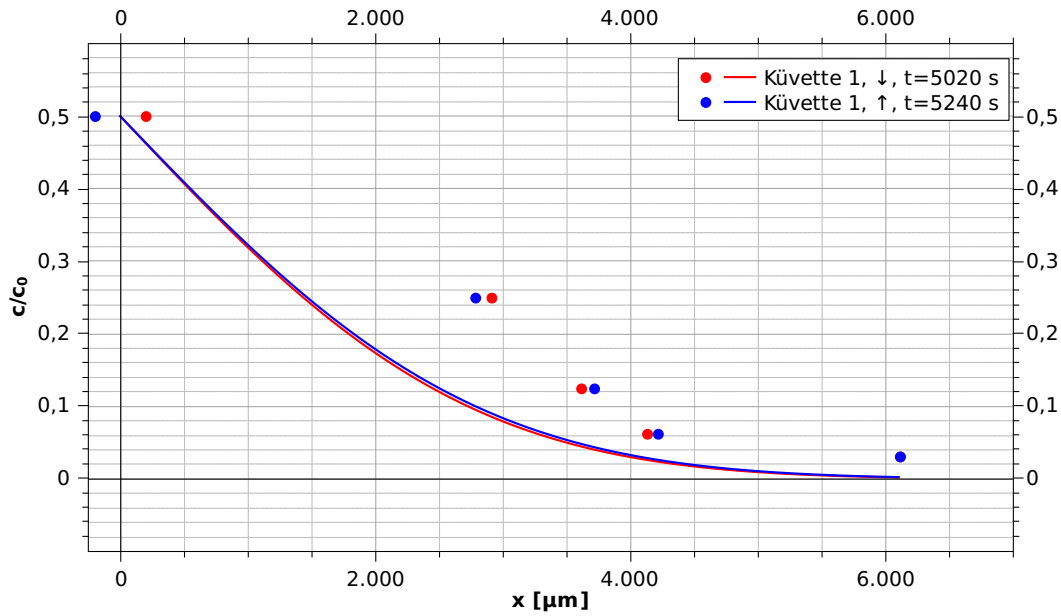


Abbildung 7: Konzentration in Abhängigkeit des Ortes und theoretischer Verlauf für Küvette 1

Versuch 9: Diffusion
 Rph ohne Filter/Küvette

Küvette 1 $\frac{c_0}{16}$

t_1 (s)	h (μm)	t_2 (s)	h (μm)
30	?	930	2550
60	?	960	2580
90	1460	990	2610
120	1500	1020	2630
150	1560	1050	2665
180	1615	1080	2685
210	1660	1110	2710
240	1710	1140	2740
270	1760	1170	2765
300	1800	1200	2785
330	18450	1230	2810
360	1890	1260	2840
390	1935	1290	2865
420	1970	1320	2890
450	2010	1350	2920
480	2055	1380	2945
510	2090	1410	2980
540	2120	1440	2980
570	2160	1470	3000
600	2200	1500	3020
630	2225	1530	3050
660	2260	1560	3070
690	2300	1590	3090
720	2330	1620	3110
750	2365	1650	3160
780	2395	1680	3180
810	2430	1710	3200
840	2460	1740	3220
870	2490	1770	3240
900	2520	1800	3265

$\frac{C_0}{32}$	t_2 (s)	h (μm)	t_2 (s)	h (μm)
Küvette 2	30	0545	930	2240
	60	0740	960	2285
	90	0805	990	2310
	120	0885	1020	2340
	150	0930	1050	2380
	180	1000	1080	2410
	210	1050	1110	2435
	240	1100	1140	2470
	270	1160	1170	2510
	300	1245	1200	2530
	330	1255	1230	2565
	360	1295	1260	2610
	390	1330	1290	2640
	420	1350	1320	2655
	450	1450	1350	2700
	480	1465	1380	2720
	510	1600	1410	2750
	540	1665	1440	2785
	570	1735	1470	2810
	600	1770	1500	2840
	630	1825	1530	2840
	660	1855	1560	2875
	690	1905	1590	2930
	720	1945	1620	2955
	750	2000	1650	2975
	780	2025	1680	2995
	810	2060	1710	3025
	840	2110	1740	3060
	870	2160	1770	3145
	900	2200	1800	3190

$\frac{C_0}{32}$	t_2 (min)	h (μm)
1	39:35min	6430
	41:30min	3315
	42:22min	3000
	43:10min	2450
	44:20min	0975

$\frac{C_0}{32}$	t_1 (h)	h (μm)
1	1:25:30	8300
	1:26:25	6400
	1:27:15	5900
	1:28:30	4970
	1:29:15	1990

$\frac{C_0}{32}$	t_2 (min)	h (μm)
2	35min	0920
	36:40min	2420
	37:55min	3610
	38:45min	4155
	39:35min	6430

$\frac{C_0}{32}$	t_1 (h)	h (μm)
2	1:24:55	2390
	1:23:20	5100
	1:24:10	5800
	1:24:50	6320
	1:25:30	8300

28

28