

# FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

## Fyzikální praktikum 2

**Zpracoval:** Jan Beran

**Naměřeno:** 15. října 2018

**Obor:** UF

**Skupina:** F3240/01

**Testováno:**

---

### Úloha . 4: Pohyblivost částic

$$T = 21,9\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$p = 987\text{ hPa}$$

$$\varphi = 44\text{ \%}$$

## 1. Povinná část

- Změřte odporovou kapacitu elektrolytické cely pomocí roztoku sádrovce.
- Změřte teplotní závislost elektrolytické vodivosti roztoku KCl. Hodnoty měřené pomocí automatického mostu přepočítejte podle správného vzorce.
- Stanovte pohyblivost iontů. Sestrojte grafy teplotní závislosti elektrické vodivosti a pohyblivosti a porovnejte s hodnotami tabelovanými.

### 1.1. Teorie

Pro odpor  $R_x$  elektrolytu v elektrolytické cele platí vztah:

$$R_x = \frac{A}{\sigma}, \quad (1)$$

kde  $A$  je odporová kapacita elektrolytické cely a  $\sigma$  je měrná vodivost roztoku. Pro určení odporové kapacity elektrolytické cely využijeme nasyceného roztoku sádrovce, u kterého známe měrnou vodivost v rozmezí  $15 - 20^{\circ}\text{C}$ .

Pro měření odporu  $R_x$  využijeme následující můstkové zapojení:

Ve stavu rovnováhy, tedy když detektorem D nepoteče proud, můžeme odpor elektrolytu vyjádřit vztahem:

$$R_x = \frac{R_a}{R_b} R \quad (2)$$

Pokud známe odporovou kapacitu elektrolytické cely, můžeme z uvedeného vzorce určovat měrnou vodivost roztoku. K tomu užijeme automatického mostu, který měří v paralelním zapojení  $R_p$  a  $C_p$  a je tedy nutno odpor  $R_x$  přepočítat vztahem:

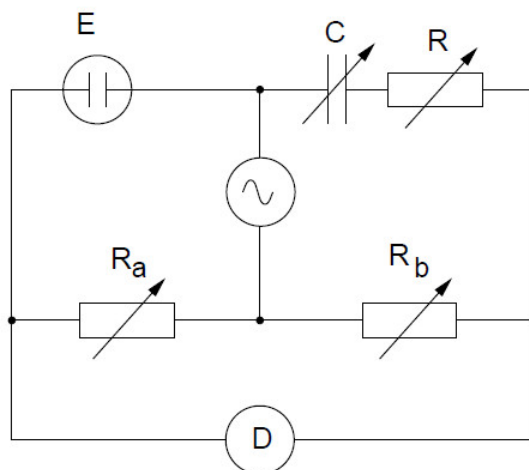
$$R_x = \frac{R_p}{1 + 4\pi^2 f^2 C_p^2 R_p^2}, \quad (3)$$

kde  $f$  je frekvence mostu.

Známe-li měrnou vodivost roztoku, můžeme určit pohyblivost iontů  $\mu$  ze vzorce:

$$\mu = \frac{\sigma}{2Fc_m}, \quad (4)$$

kde  $F$  je Faradayův náboj a  $c_m$  je molarita.



Obrázek 1: Střídavý most pro měření vodivosti elektrolytů. E – elektrolytická sada, D – detektor (osciloskop, C – proměnná kapacita.)

## 1.2. Postup měření

Zapojil jsem obvod podle schématu na obrázku 1. Elektrolytickou celu jsem ponořil do roztoku sádrovce. Roztok s elektrolytickou celou se postupně zahříval od  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zároveň jsem vyrovnával most hodnotou kapacity  $C$  a odporu  $R$ . Závislost  $R$  na  $T$  jsem tímto způsobem proměřil v rozmezí uvedených teplot a zaznamenával jsem tyto hodnoty do tabulky.

Druhou část úkolu jsem měřil pomocí RLCG obvodu, který se lišil od předchozího zapojení z obrázku 1 v paralelním zapojení odporu  $R$ . Roztok sádrovce z minulé úlohy jsem vylil, opláchl jsem elektrolytickou celu destilovanou vodou a tentokrát ji ponořil do roztoku KCl. Tento roztok jsem tentokrát zahříval na topném hnízdě až do teploty  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Přičemž jsem zaznamenával hodnoty kapacity  $C_p$  a odporu  $R_p$  pro každý teplotní stupeň.

## 1.3. Naměřené hodnoty

$$R_a = 500\ \Omega$$

$$R_b = 500\ \Omega$$

$$f = 1\text{ kHz}$$

$$F = 96485\text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$c_m = 20\text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$$

Tabulka 1: Naměřené hodnoty odporu  $R$  v závislosti na teplotě a tabelované hodnoty  $\sigma$  pro odpovídající teploty.

$T\text{ }[^{\circ}\text{C}]$	$\sigma\text{ }[\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$	$R\text{ }[\Omega]$
15	0,1734	462
16	0,1782	456
17	0,1831	449
18	0,1880	440
19	0,1928	429
20	0,1976	415
21	0,2024	403

Tabulka 2: Naměřené hodnoty odporu  $R_p$  a kapacity  $C_p$

$T$ [°C]	$C_p$ [ $\mu$ F]	$R_p$ [ $\Omega$ ]	$T$ [°C]	$C_p$ [ $\mu$ F]	$R_p$ [ $\Omega$ ]	$T$ [°C]	$C_p$ [ $\mu$ F]	$R_p$ [ $\Omega$ ]
12	0,2137	517,0	32	0,2948	434,7	52	0,3524	398,1
13	0,2152	516,1	33	0,2978	431,0	53	0,3552	395,5
14	0,2235	511,2	34	0,3014	431,7	54	0,3575	393,8
15	0,2277	506,5	35	0,3047	429,3	55	0,3603	391,5
16	0,2316	501,4	36	0,3082	427,2	56	0,3639	388,8
17	0,2361	496,6	37	0,3111	425,1	57	0,3664	387,3
18	0,2401	491,5	38	0,3142	423,7	58	0,3685	384,9
19	0,2445	486,4	39	0,3142	422,2	59	0,3716	383,2
20	0,2483	481,7	40	0,3173	420,7	60	0,3731	381,5
21	0,2528	477,5	41	0,3200	419,6	61	0,3765	379,3
22	0,2561	472,3	42	0,3222	419,0	62	0,3797	376,5
23	0,2598	469,0	43	0,3250	417,8	63	0,3814	371,7
24	0,2643	465,8	44	0,3270	414,5	64	0,3855	372,2
25	0,2688	460,7	45	0,3309	414,5	65	0,3848	370,6
26	0,2715	457,3	46	0,3334	412,9	66	0,3913	368,6
27	0,2759	449,7	47	0,3366	410,7	67	0,3929	367,0
28	0,2794	446,5	48	0,3398	408,4	68	0,3958	365,4
29	0,2831	443,3	49	0,3321	406,3	69	0,3981	364,4
30	0,2871	440,2	50	0,3461	402,8	70	0,4012	363,5
31	0,2908	437,1	51	0,3492	400,3	71	0,4051	362,5

## 1.4. Zpracování měření

Tabulka 3: Vypočtené hodnoty odporu  $R_x$ , odporové kapacity elektrolytické cely  $A$  pro jednotlivé teploty, a tedy pro jednotlivé vodivosti roztoku.

$T$ [°C]	$R_x$ [ $\Omega$ ]	$A$ [ $\text{m}^{-1}$ ]
15	462	80,1108
16	456	81,2592
17	449	82,2119
18	440	82,7200
19	429	82,7112
20	415	82,0040
21	403	81,5672

Výsledek odporové kapacity elektrolytické je

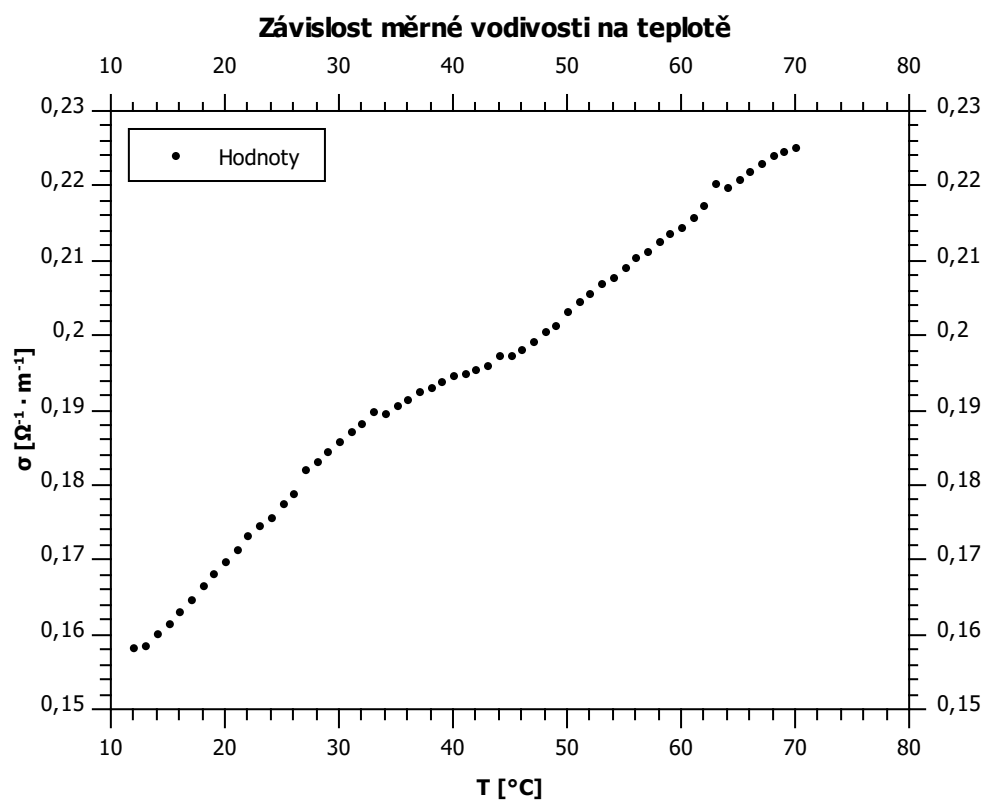
$$A = (81,8 \pm 0,9) \text{ m}^{-1} \quad (5)$$

Tabulka 4: Vypočtené hodnoty odporu  $R_x$ , měrné vodivosti roztoku  $\sigma$  a pohyblivost iontů  $\mu$  pro teploty od 12 °C do 70 °C.

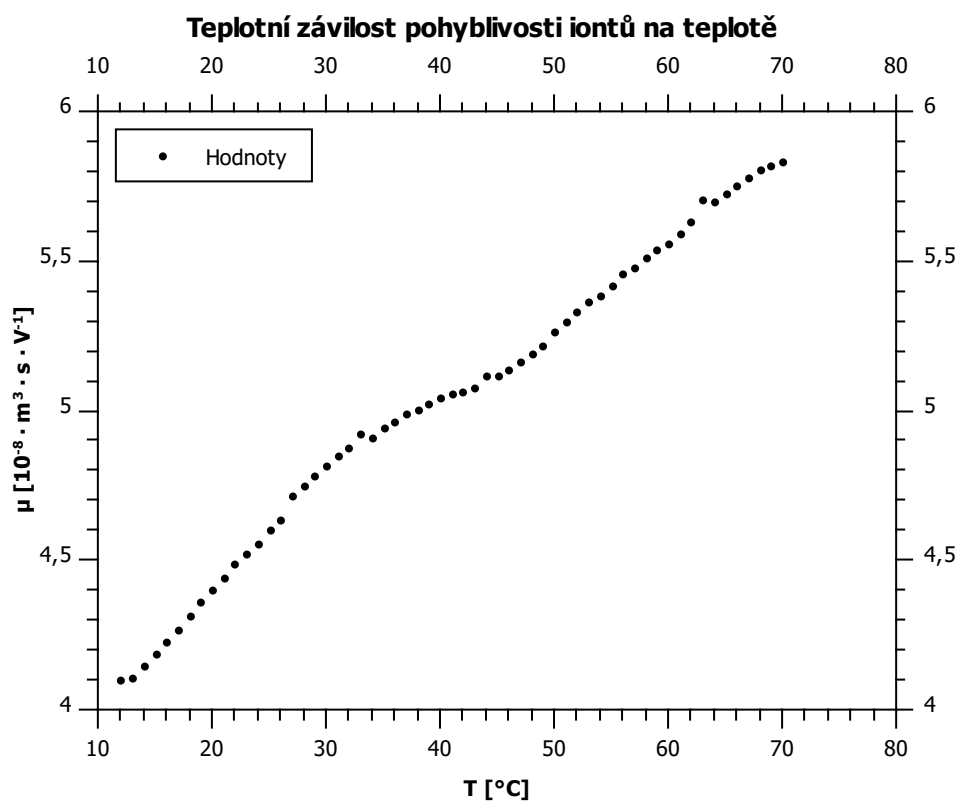
$T$ [°C]	$R_x$ [ $\Omega$ ]	$\sigma$ [ $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	$\mu$ [ $10^{-8} \cdot \text{m}^3 \text{sV}^{-1}$ ]
12	516,7509806	0,158292408	4,101477118
13	515,8487903	0,158569252	4,108650369
14	510,9366911	0,160093723	4,148150563
15	506,2341736	0,161580868	4,186683621
16	501,1332154	0,163225575	4,229299231
17	496,3306368	0,164804973	4,270222641
18	491,229929	0,166516232	4,314562687
19	486,12857	0,168263628	4,359839049
20	481,4281058	0,169906485	4,402406708
21	477,2254722	0,171402747	4,441176018
22	472,0273635	0,173290286	4,490083598
23	468,7252712	0,174511088	4,521715497
24	465,5214554	0,17571211	4,552834887
25	460,4212518	0,177658517	4,6032678
26	457,0218745	0,17897996	4,637507395
27	449,4268696	0,182004599	4,715878079
28	446,2258349	0,183310222	4,749707787
29	443,0245361	0,184634823	4,784029213
30	439,9226012	0,185936701	4,817761844
31	436,8213776	0,187256763	4,851965658
32	434,4183536	0,18829259	4,87880474
33	430,7198694	0,189909412	4,920697821
34	431,4116604	0,189604882	4,912807226
35	429,0102015	0,190666228	4,940307515
36	426,9078381	0,191605189	4,964636705
37	424,8066843	0,192552895	4,989192499

Tabulka 5: Vypočtené hodnoty odporu  $R_x$ , měrné vodivosti roztoku  $\sigma$  a pohyblivost iontů  $\mu$  pro teploty od 12 °C do 70 °C.

T [°C]	$R_x$ [ $\Omega$ ]	$\sigma$ [ $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	$\mu$ [ $10^{-8} \cdot \text{m}^3 \text{sV}^{-1}$ ]
38	423,4037586	0,193190909	5,005723921
39	421,9068923	0,193876323	5,023483525
40	420,4042573	0,194569288	5,041438772
41	419,3015585	0,195080975	5,054696982
42	418,6987393	0,195361842	5,061974455
43	417,496109	0,195924597	5,076555869
44	414,1995889	0,197483916	5,116959021
45	414,1923857	0,197487351	5,117048009
46	412,591324	0,198253701	5,136904727
47	410,3903746	0,199316948	5,16445427
48	408,089733	0,200440615	5,193569334
49	406,0081713	0,201468253	5,220196223
50	402,4911837	0,203228693	5,265810553
51	399,9914453	0,204498766	5,298719129
52	397,7909187	0,205630026	5,328030941
53	395,1921006	0,206982267	5,363068542
54	393,4921059	0,207876488	5,38623848
55	391,1927127	0,209098366	5,417898273
56	388,4929836	0,21055144	5,455548522
57	386,9923407	0,211367896	5,476703541
58	384,5945531	0,212685688	5,510848517
59	382,8934918	0,213630576	5,535331282
60	381,1951061	0,21458239	5,559993527
61	378,9948659	0,21582814	5,592271857
62	376,1964798	0,217433606	5,633870694
63	371,4053161	0,22023852	5,706548158
64	371,8977357	0,219946908	5,698992274
65	370,3026968	0,220894305	5,723540069
66	368,297524	0,222096951	5,754701524
67	366,6989992	0,223065122	5,779787584
68	365,0985186	0,224042971	5,805124411
69	364,0975034	0,224658934	5,821084471
70	363,1950474	0,22521716	5,835548524



Obrázek 2: Závislost měrné vodivosti  $\sigma$  na teplotě v roztoku KCl.



Obrázek 3: Závislost pohyblivosti iontů  $\mu$  na teplotě v roztoku KCl

## 2. Povinně volitelná část – varianta B

- Změřte odpor měděného drátu za pokojové teploty.
- Potom použijte ohřátou kapalinu z předchozí části, ponořte do ní měděný drát a změřte teplotní závislost jeho odporu při chladnutí kapaliny.
- Ze známých rozměrů drátu (délka použitého drátu je 29 m a jeho průměr je 0,112 mm) vypočítejte teplotní závislost měrného odporu a pohyblivosti volných elektronů v mědi.

### 2.1. Teorie

Pro odpor drátu platí vztah

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{S}, \quad (6)$$

kde  $L$  je délka a  $S$  průřez drátu.

Měření odporu a stanovení měrného odporu provedeme stejně, jako v předchozím případě pomocí automatického mostu. Pohyblivost volných elektronů pak můžeme spočítat jako

$$\mu = \frac{\sigma}{e_0 n}, \quad (7)$$

kde  $e_0$  je elementární náboj a  $n$  je koncentrace volných elektronů.

### 2.2. Postup měření

Povinně volitelnou část jsem měřil na stejných přístrojích se stejným zapojením jako povinnou část. Nejprve jsem změřil odpor drátu za pokojové teploty. Následně jsem do již ohřátého roztoku KCl z povinné části tento drát ponořil. Roztok jsem ochlazoval z teploty 55 °C do teploty 41 °C a pro každý stupeň jsem zaznamenával hodnoty odporu  $R$  drátu.

### 2.3. Naměřené hodnoty

$$\begin{aligned} L &= 29 \text{ m} \\ S &= 4,92 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \\ e_0 &= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ n &= 8,5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3} \end{aligned}$$

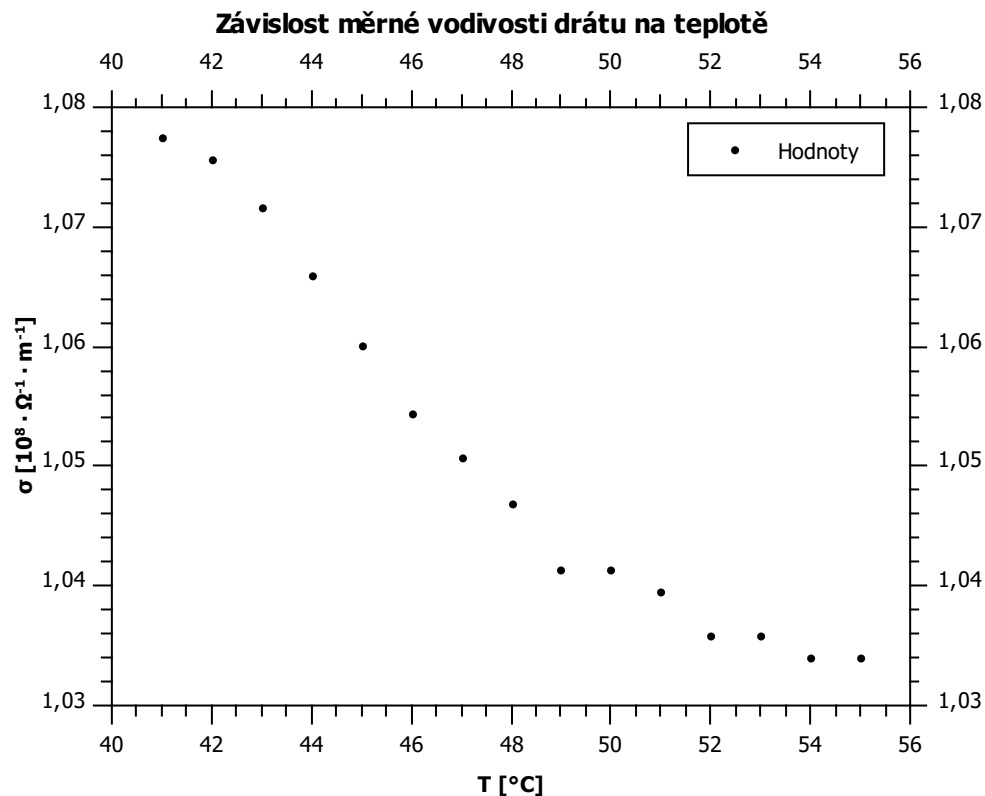
Tabulka 6: Hodnoty odporu drátu – ponořeného do lázně KCl – v závislosti na teplotě.

T [°C]	R [Ω]	48	56,3
55	57,0	47	56,1
54	57,0	46	55,9
53	56,9	45	55,6
52	56,9	44	55,3
51	56,7	43	55,0
50	56,6	42	54,8
49	56,6	41	54,7

## 2.4. Zpracování měření

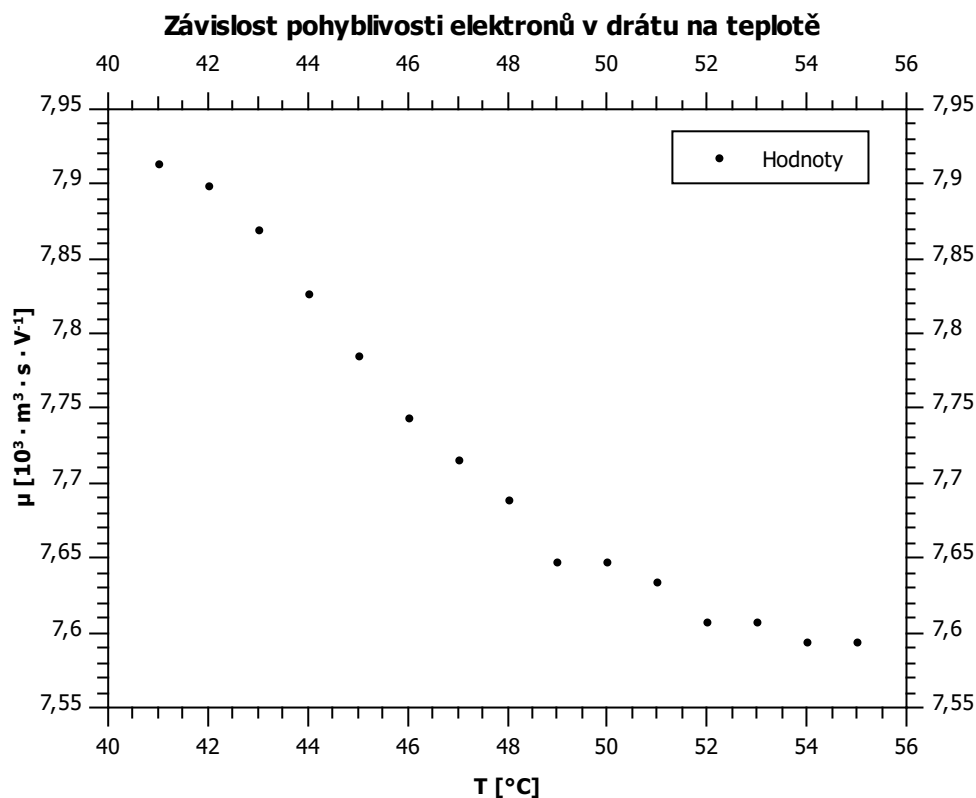
Tabulka 7: Vypočtené hodnoty měrné vodivosti  $\sigma$  a pohyblivosti elektronů  $\mu$  v kovovém drátu.

T [°C]	$\sigma$ [ $10^8 \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	$\mu$ [ $10^{-3} \cdot \text{m}^3 \text{sV}^{-1}$ ]
55	1,034089288	7,594105076
54	1,034089288	7,594105076
53	1,035906668	7,607451483
52	1,035906668	7,607451483
51	1,03956066	7,634285527
50	1,04139734	7,647773664
49	1,04139734	7,647773664
48	1,046946526	7,688525566
47	1,050678956	7,715935639
46	1,054438094	7,743541849
45	1,060127508	7,78532355
44	1,065878652	7,827558578
43	1,071692535	7,870254352
42	1,075603822	7,898977908
41	1,077570191	7,913418453



Obrázek 4: Závislost měrné vodivosti drátu  $\sigma$  na teplotě  $T$ .





Obrázek 5: Závislost pohyblivosti elektronů v drátu  $\mu$  na teplotě  $T$ .

### 3. Závěr

V první povinné části úlohy jsem určil odporovou kapacitu  $A$  elektrolytické cely, jejíž hodnota je

$$A = (81,8 \pm 0,9) \text{ m}^{-1} \quad (8)$$

Pomocí níž, jsem určoval závislost měrné vodivosti  $\sigma$  a pohyblivosti iontů  $\mu$  na teplotě. Z grafů z povinné části je vidět, že jsem potvrdili lineární závislost. Zcela jasné to ovšem není v povinně volitelné úkolu. Pakliže porovnáme grafy, z povinné části s grafy z části povinně volitelné, tak vidíme, že jsou závislosti z první části „přímější“ – je více vidět předpokládaná závislost. To je samozřejmě dáno větším počtem bodů, ale také určitou chybou v povinně volitelné části měření, které jsem se dopustil ochlazováním roztoku pomocí vodní lázně.