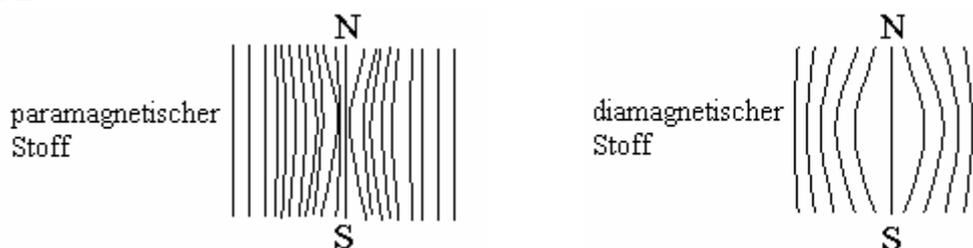


Protokoll zum Versuch
Suszeptibilitätsmessungen mit der Gouy-Waage
Betreuerin: Kirsten Feddern

1. Theorie

Materie, die einem magnetischen Feld ausgesetzt ist, zeigt verschiedene Effekte. Einige davon sind makroskopisch beobachtbar, bekanntestes Beispiel ist der Ferromagnetismus: Metallisches Eisen wird von einem Magneten angezogen

Die Grundlagen dieser Effekte sind jedoch um etliche Größenordnungen kleiner und ihre Ursachen sind im atomaren Bereich zu finden. Jede Materie zeigt im magnetischen Feld einen diamagnetischen Effekt., das heißt, die Materie wird vom Feld abgestoßen. Bestimmte Stoffe zeigen einen sogenannten paramagnetischen Effekt, sie werden in ein Magnetfeld hineingezogen. Der paramagnetische Effekt überwiegt gegenüber dem diamagnetischen.



Magnetische Wechselwirkungen können durch zwei Größen beschrieben werden, durch die Permeabilität μ , die als Durchlässigkeit der Materie für das magnetische Feld; und die Suszeptibilität χ , die Aufnahmefähigkeit. Beide hängen zusammen durch $\chi = \mu - 1$.

Die Stärke des Magnetfeldes wird durch die Flußdichte B oder die magnetische Feldstärke H beschrieben.

Wenn nun Materie in ein Magnetfeld gebracht wird, so entsteht durch die genannten Effekte ein im Inneren der Probe ein neues Feld (eine neue Induktion) B_{innen} .

In diesem Versuch sollen die Suszeptibilitäten von drei paramagnetischen Stoffen bestimmt werden. Aus diesen entsprechend die stoffspezifischen Molsuszeptibilitäten und zusätzlich die Zusammensetzung eines binären Gemisches von zwei Stoffen anhand der ermittelten Werte.

2. Versuchsdurchführung:

Vermessene Stoffe:	1. Eichprobe $\text{Hg}[\text{Co}(\text{SCN})_4]$	373,0mg	55,6mm
	2. Mangan(II)oxid MnO	639,9mg	51,0mm
	3. Nickel(II)chlorid $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	296,3mg	51,0mm
	4. Kupfer(II)chlorid $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	391,5mg	53,0mm
	5. Nickel-Kupfer-Gemisch	349,9mg	51,8mm

Die zu vermessene zylindrische Probe (Salz bekannter Art und Masse, pulverisiert, in ein NMR-Röhrchen aus Quarzglas abgefüllt) hängt senkrecht in einem waagrecht angeordneten Magnetfeld. Die Unterkante der Probe hängt genau in der Mitte des dort homogenen Magnetfeldes und reicht nach oben aus dem Magnetfeld heraus. Das Feld wird von einem Elektromagneten erzeugt und kann im Zentrum als homogen und nach außen hin als immer stärker inhomogen betrachtet werden

Die Probe hängt an einer empfindlichen Waage, so daß bei paramagnetischen Stoffen, wie sie hier vermessen werden, die Masse der Probe scheinbar zunimmt, wenn ein Magnetfeld angelegt bzw. verstärkt wird. Bei diamagnetischen Stoffen, wie dem leeren Probenhalter, ist entsprechend eine Massenabnahme zu verzeichnen, da diamagnetische Stoffe ja vom Feld abgestoßen werden.

Die Massenveränderung wird auf einem Schreiber (25cm) als Spannung (0,2mg entsprechen genau 1mV) registriert. Die Feldstärke wird über den Umweg der Hallspannung gemessen. Ein bandförmiger Leiter wird durch das Feld geführt, senkrecht zu den Feldlinien. Fließt dort ein Strom, werden die Elektronen durch das Magnetfeld (Lorentzkraft) zu einer Seite des Leiters abgedrängt. Durch diese Ladungstrennung baut sich in sehr kurzer Zeit ein elektrisches Feld im Leiter auf, daß dem äußeren Feld entgegenwirkt. Damit entsteht zwischen den Seiten des Leiters eine Spannungsdifferenz, die als Hallspannung bezeichnet wird und meßbar ist. Sie ist proportional zur Stärke des Magnetfeldes.

Es ist sinnvoll, mit dem vorhandenen Aufbau zunächst die Eichprobe und die anderen Proben zu vermessen, damit sichergestellt ist, daß die Geräte Betriebstemperatur haben und unter konstanten Bedingungen „eingearbeitet“ sind, bevor man den leeren Probenhalter vermisst. Bei unserer Durchführung trat während des Versuchs am Elektromagneten ein Relais-Defekt auf, der zum Abbruch der Messungen und Fortsetzung an einem anderen Tag führte. Dann verhinderten nicht zu korrigierende Unregelmäßigkeiten der Waage und des

Schreibers die Ermittlung der Werte für das Leerrohr, daher wird bei der Auswertung auf gegebene Werte zurückgegriffen.

3. Meßergebnisse und Auswertung

Messung der Suszeptibilität und Bestimmung der Molsuszeptibilität

Die „Massenänderung“ der Probe ist abhängig von der Feldstärke und der Suszeptibilität der Probe. Unter der Annahme, daß die Feldstärke in der Mitte des Feldes am größten und an der Oberkante der Probe 0 ist, ergibt sich für die Massenänderung

$$\Delta m = \frac{\chi_m \cdot m_p}{2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot g} \cdot B_{\max}^2 \quad (1)$$

mit Δm scheinbare Massenänderung, χ_m Massensuszeptibilität, m_p Probenmasse, μ_0 magn. Feldkonstante, l Länge der Probe, B_{\max} maximale magn. Induktion.

Gemessen wird aus den genannten Gründen immer die Differenz aus der Massenzunahme durch die paramagnetische Probe und der Massenabnahme durch das diamagnetische Glasröhrchen.

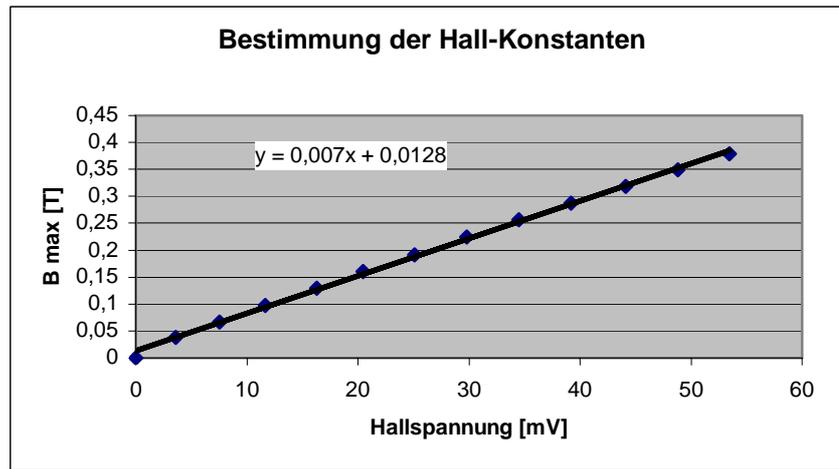
Die Korrektur des Probenhalters muß zuerst ermittelt werden, damit anhand der Eichprobe die Hall-Konstante und damit die Feldstärke des Magnetfeldes zugänglich ist. Hierzu würde in einem Diagramm das Quadrat der Hallspannung gegen die scheinbare Massenänderung aufgetragen, was eine Gerade ergeben soll. Da die Messung nicht durchgeführt wurde, wird mit der gegebenen Steigung der Geraden von $-0,1 \cdot 10^{-3} \text{ mg/mV}^2$ gerechnet.

Durch die Vermessung einer Eichprobe mit bekannter Suszeptibilität kann aus (1) die maximale Feldstärke berechnet werden mit den Werten

$$\begin{aligned} \chi_m (\text{Eichprobe}) &= 2,08 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} & l (\text{EP}) &= 55,6 \cdot 10^{-3} \text{ m} \\ m_p (\text{EP}) &= 373 \cdot 10^{-6} \text{ kg} & g &= 9,81 \text{ ms}^{-2} \\ \mu_0 &= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}^2 \text{J}^{-1} \text{m}^3 \end{aligned}$$

Für den Zusammenhang zwischen Feldstärke und Hallspannung muß die Hallkonstante ermittelt werden, indem in einem Diagramm die Hallspannung gegen die Feldstärke aufgetragen wird. Die Hallkonstante C_H ergibt sich als Steigung der Geraden, die durch lineare Regression ermittelt wird.

Schreiber- ausschlag [mm]	entspricht mV	entspricht mg Massenänderung	Massenänderung durch Röhrchen	Massenänderung Eichsubstanz [mg]	Hallspannung [mV]	B_{\max} [T]	B_{\max}^2 [T ²]
0,0	0,0	0,00	-0,0004	0,0004	0	0,0025	0,0000
1,0	0,4	0,08	-0,0030	0,0830	3,59	0,0383	0,0015
3,0	1,2	0,24	-0,0089	0,2489	7,55	0,0664	0,0044
6,5	2,6	0,52	-0,0184	0,5384	11,68	0,0976	0,0095
11,5	4,6	0,92	-0,0331	0,9531	16,28	0,1298	0,0169
17,5	7,0	1,40	-0,0500	1,4500	20,45	0,1602	0,0256
25,0	10,0	2,00	-0,0729	2,0729	25,1	0,1915	0,0367
34,5	13,8	2,76	-0,1005	2,8605	29,8	0,2249	0,0506
45,0	18,0	3,60	-0,1326	3,7326	34,51	0,2570	0,0660
56,5	22,6	4,52	-0,1690	4,6890	39,21	0,2880	0,0829
69,0	27,6	5,52	-0,2118	5,7318	44,12	0,3184	0,1014
83,0	33,2	6,64	-0,2572	6,8972	48,81	0,3493	0,1220
98,0	39,2	7,84	-0,3063	8,1463	53,44	0,3796	0,1441

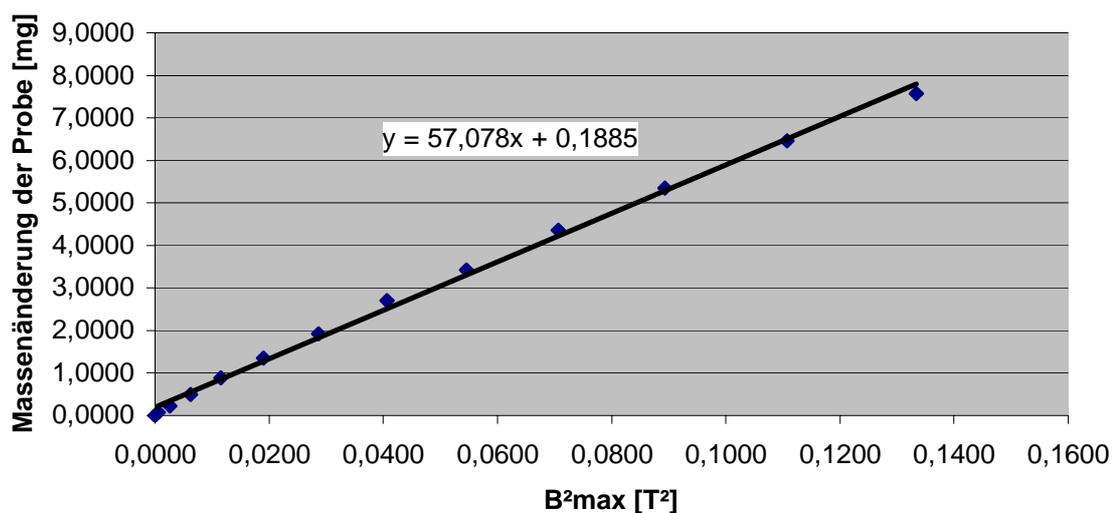


Demnach ergibt sich die Hall-Konstante zu 0,007 T/mV.

Mit dieser kann nun die Suszeptibilität von $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ bestimmt werden

Schreiber- ausschlag [mm]	entspricht mV	entspricht mg Massen- änderung	Massen- änderung durch Röhrrchen	Massen- änderung NiCl_2 [mg]	Änderung der Hallspannung [mV]*	Bmax [T]	Bmax ² [T ²]
0,0	0,0	0,00	-0,0004	0,0004	0,00	0,0000	0,0000
1,0	0,4	0,08	-0,0030	0,0830	3,51	0,0242	0,0006
3,0	1,2	0,24	-0,0087	0,2487	7,34	0,0506	0,0026
6,5	2,6	0,52	-0,0179	0,5379	11,41	0,0787	0,0062
11,5	4,6	0,92	-0,0309	0,9509	15,61	0,1077	0,0116
17,5	7,0	1,40	-0,0482	1,4482	19,98	0,1379	0,0190
25,0	10,0	2,00	-0,0702	2,0702	24,53	0,1693	0,0286
35,0	14,0	2,80	-0,0972	2,8972	29,21	0,2015	0,0406
44,5	17,8	3,56	-0,1285	3,6885	33,87	0,2337	0,0546
56,5	22,6	4,52	-0,1640	4,6840	38,53	0,2659	0,0707
69,5	27,8	5,56	-0,2052	5,7652	43,33	0,2990	0,0894
84,0	33,6	6,72	-0,2520	6,9720	48,23	0,3328	0,1107
98,5	39,4	7,88	-0,3014	8,1814	52,93	0,3652	0,1334

*Durch Restmagnetisierung zeigte das Meßgerät bereits bei stromlosem Elektromagneten immer eine Hallspannung von ca. 1,9mV die entsprechend von den Werten abgezogen wurde.



$$\frac{\chi_m \cdot m_P}{2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot g} = 57,078 \text{ mg/T}^2$$

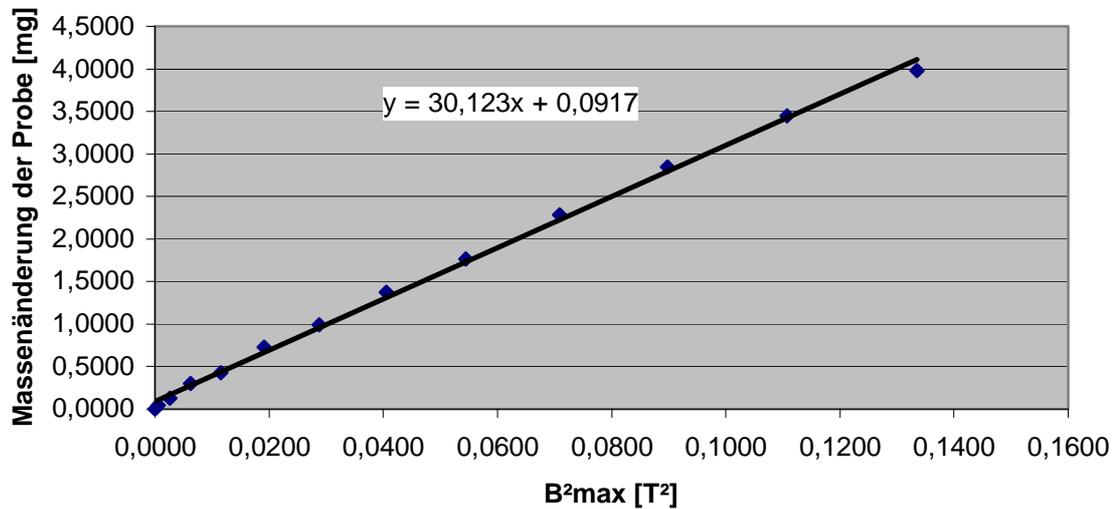
mit $m_P = 296,3 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$ und $l = 51,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Umstellen der Gleichung nach χ_m ergibt eine Suszeptibilität von $2,42 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$

und Umrechnen auf 1 Mol mit der Molmasse von $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 237,69 \text{ g/mol}$ ergibt eine Molsuszeptibilität von $5,76 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{mol}$ (Literaturwert $5,33 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{mol}$)

ganz analog die Bestimmung für CuCl_2 :

Schreiber- ausschlag [mm]	entspricht mV	entspricht mg Massen- änderung	Massen- änderung durch Röhrrchen	Massen- änderung CuCl_2 [mg]	Änderung der Hallspannung [mV]	B_{\max} [T]	B_{\max}^2 [T ²]
0,0	0,0	0,00	-0,0004	0,0004	0,00	0,0000	0,0000
0,5	0,2	0,04	-0,0030	0,0430	3,52	0,0243	0,0006
1,5	0,6	0,12	-0,0086	0,1286	7,34	0,0506	0,0026
3,5	1,4	0,28	-0,0179	0,2979	11,44	0,0789	0,0062
5,0	2,0	0,40	-0,0308	0,4308	15,60	0,1076	0,0116
8,5	3,4	0,68	-0,0483	0,7283	20,02	0,1381	0,0191
11,5	4,6	0,92	-0,0705	0,9905	24,60	0,1697	0,0288
16,0	6,4	1,28	-0,0969	1,3769	29,18	0,2013	0,0405
20,5	8,2	1,64	-0,1281	1,7681	33,84	0,2335	0,0545
26,5	10,6	2,12	-0,1643	2,2843	38,59	0,2663	0,0709
33,0	13,2	2,64	-0,2060	2,8460	43,44	0,2997	0,0898
40,0	16,0	3,20	-0,2517	3,4517	48,22	0,3327	0,1107
46,0	18,4	3,68	-0,3014	3,9814	52,95	0,3654	0,1335

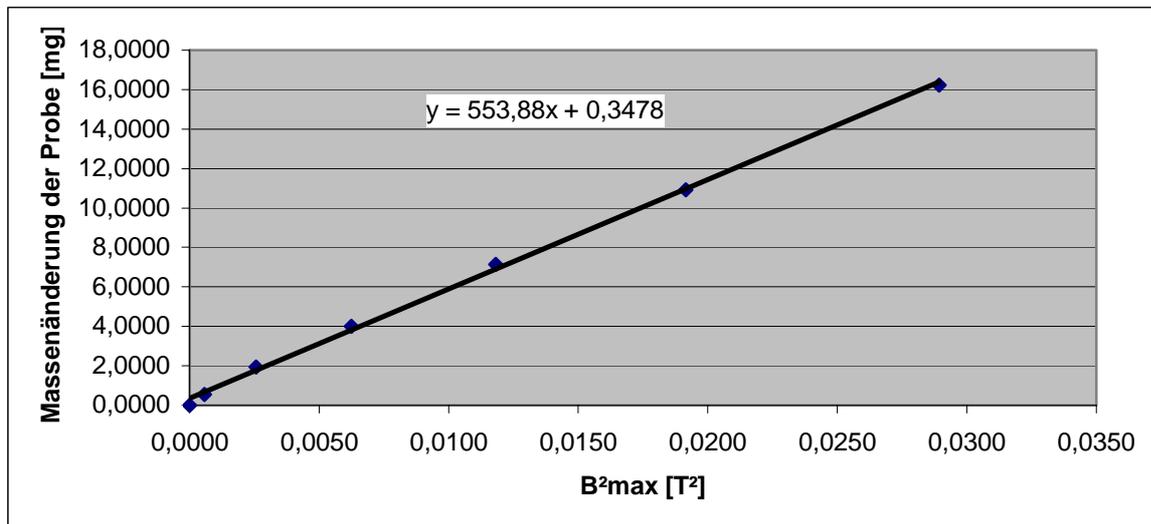


mit $m_p (\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}) = 391,5 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$ und $l = 53,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ergibt eine Suszeptibilität der Probe von $1,01 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ und mit der Molmasse $M = 170,48 \text{ g/mol}$ folgt eine Molsuszeptibilität von $1,71 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{mol}$ (Literaturwert $1,78 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{mol}$)

Der gleiche Vorgang für MnO , hierbei ist allerdings zu beachten, daß der Meßbereich (Ausschlag 25cm) jetzt nicht mehr 100mV sondern 200mV sind):

Schreiber- ausschlag [mm]	entspricht mV	entspricht mg Massen- änderung	Massen- änderung durch Röhrrchen	Massen- änderung MnO [mg]	Änderung der Hallspannung [mV]	B_{\max} [T]	B_{\max}^2 [T ²]
0,0	0,0	0,00	-0,0004	0,0004	0,00	0,0000	0,0000
3,5	2,8	0,56	-0,0029	0,5629	3,45	0,0238	0,0006
12,0	9,6	1,92	-0,0087	1,9287	7,35	0,0507	0,0026
25,0	20,0	4,00	-0,0180	4,0180	11,46	0,0791	0,0063
44,5	35,6	7,12	-0,0314	7,1514	15,76	0,1087	0,0118
68,0	54,4	10,88	-0,0485	10,9285	20,06	0,1384	0,0192
101,0	80,8	16,16	-0,0708	16,2308	24,65	0,1701	0,0289

bei höheren Magnetfeldstärken klebte die Probe an einem Pol des Elektromagneten, dadurch war die Wägung nicht mehr möglich



Die Suszeptibilität der 639,9 mg schweren und 51 mm langen Probe beträgt $1,088 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$.
Damit ergibt sich die Molsuszeptibilität (mit $M = 70,94 \text{ g}$) zu $7,72 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{mol}$. Der Literaturwert beträgt $6,09 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{mol}$

Die große Abweichung vom Literaturwert läßt sich vielleicht mit dem im Vergleich zu den anderen Proben großen Werten erklären, die den Versuchsaufbau schon an seine Grenzen bringen. Schon nach 2/3 der sonst vermessenen Feldstärke war die Ablenkung zur Seite durch die Anziehung des Magneten so groß, daß die Probe komplett angezogen wurde, eine seitliche Scherkraft trat aber sicherlich schon vorher auf, diese dürfte die Messung nachteilig beeinflusst haben.

Nun ist die **Zusammensetzung eines Gemisches aus Kupferchlorid und Nickelchlorid** zu bestimmen. Die beiden Komponenten reagieren nicht miteinander.

Die Molsuszeptibilität eines Gemisches ist deshalb nach dem Wiedemannschen Gesetz berechenbar.

$\chi_{mol,G} = \sum (x_i \cdot \chi_{mol,i})$ mit x_i = Molenbruch der Komponente i und χ_i Molsuszeptibilität der Komponente i

hier also: $\chi_{m,G} \cdot m_G = \chi_{m,Ni} \cdot m_{Ni} + \chi_{m,Cu} \cdot m_{Cu}$, Umstellen: $m_{Ni} = m_G \cdot \frac{(\chi_{m,G} - \chi_{m,Cu})}{(\chi_{m,Ni} - \chi_{m,Cu})}$

Die Massensuszeptibilitäten wurden berechnet

$\chi_{m,G}$	=	$1,65 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$
$\chi_{m,Ni}$	=	$2,42 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$
$\chi_{m,Cu}$	=	$1,01 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$

Die Probenmasse beträgt 349,9 mg.

Mit diesen Daten läßt sich die Zusammensetzung des Gemisches berechnen

$$m_{Ni} = 163,8 \text{ mg}$$

$$m_{Cu} = 186,1 \text{ mg}$$

Der Molenbruch ist definiert als Stoffmengenanteil einer Komponente, also als Quotient der Stoffmenge der Komponente i und der Gesamtstoffmenge, deshalb werden zuerst die Stoffmengen der Komponente berechnet:

$$n_{Ni} = \frac{m_{Ni}}{M_{Ni}} = \frac{163,8 \cdot 10^{-3} \text{ g}}{237,69 \text{ g/mol}} = 6,89 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \quad \text{und}$$

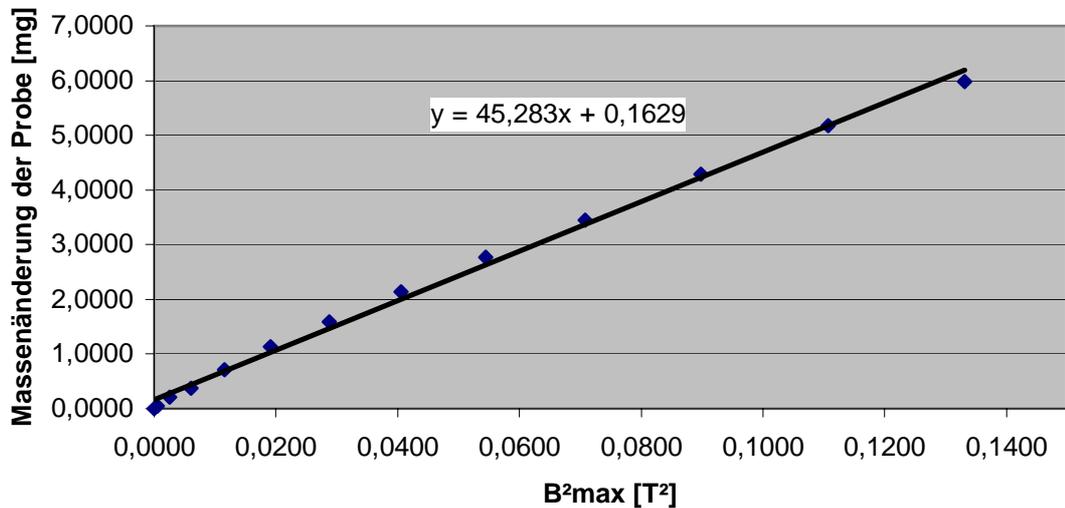
$$n_{Cu} = \frac{m_{Cu}}{M_{Cu}} = \frac{186,1 \cdot 10^{-3} \text{ g}}{170,48 \text{ g/mol}} = 1,092 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \quad , \text{ also folgt für die Molenbrüche}$$

$$x_{Ni} = \mathbf{0,39}$$

$$x_{Cu} = \mathbf{0,61}$$

Meßwerte zu dieser Berechnung:

Schreiber- ausschlag [mm]	entspricht mV	entspricht mg Massen- änderung	Massen- änderung durch Röhrrchen	Massen- änderung Probe [mg]	Änderung der Hallspannung [mV]	Bmax [T]	Bmax ² [T ²]
0,0	0,0	0,00	-0,0004	0,0004	0,00	0,0000	0,0000
0,5	0,2	0,04	-0,0029	0,0429	3,49	0,0241	0,0006
2,5	1,0	0,20	-0,0085	0,2085	7,30	0,0504	0,0025
4,5	1,8	0,36	-0,0176	0,3776	11,31	0,0780	0,0061
8,5	3,4	0,68	-0,0308	0,7108	15,61	0,1077	0,0116
13,5	5,4	1,08	-0,0482	1,1282	20,01	0,1381	0,0191
19,0	7,6	1,52	-0,0703	1,5903	24,58	0,1696	0,0288
25,5	10,2	2,04	-0,0969	2,1369	29,19	0,2014	0,0406
33,0	13,2	2,64	-0,1279	2,7679	33,83	0,2334	0,0545
41,0	16,4	3,28	-0,1640	3,4440	38,56	0,2661	0,0708
51,0	20,4	4,08	-0,2059	4,2859	43,44	0,2997	0,0898
61,5	24,6	4,92	-0,2517	5,1717	48,23	0,3328	0,1107
71,0	28,4	5,68	-0,3004	5,9804	52,87	0,3648	0,1331



Bei einer Probenmasse von 349,9 mg und einer Probenlänge von 51,8mm ergibt sich eine Suszeptibilität der Probe von $1,65 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$

Bestimmung der magnetischen Momente aus den gemessenen Molsuszeptibilitäten

Die Curie-Formel läßt sich umformen nach :
$$\mu_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{3 \cdot R \cdot T \cdot \chi_M}{N_A^2 \cdot \mu_0}}$$

mit μ_{eff} = effektives magnetisches Moment, N_A = Avogadro-Zahl und μ_0 = Permeabilitätszahl des Vakuums. Einsetzen der Konstanten und der Temperatur (298K) führt zu

$$\mu_{\text{eff}} = 1,28 \cdot 10^{-19} \cdot \chi_{\text{mol}}^{1/2}$$

mit den berechneten Molsuszeptibilitäten ergibt sich

$$\mu_{\text{eff}} (\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) = 3,06 \cdot 10^{-23} \text{ J/T}$$

$$\mu_{\text{eff}} (\text{CuCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) = 1,67 \cdot 10^{-23} \text{ J/T}$$

$$\mu_{\text{eff}} (\text{MnO}) = 3,55 \cdot 10^{-23} \text{ J/T}$$

Das Magnetische Moment wird normalerweise als Vielfaches des Bohrschen Magnetons $\mu_B = 9,27408 \cdot 10^{-24} \text{ J/T}$ angegeben, daraus folgt

$$\mu_{\text{eff}} (\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) / \mu_B = 3,30$$

$$\mu_{\text{eff}} (\text{CuCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) / \mu_B = 1,80$$

$$\mu_{\text{eff}} (\text{MnO}) / \mu_B = 3,83$$

Bestimmung der theoretischen magnetischen Momente und der Termsymbole

Zur Berechnung der theoretischen magnetischen Momente und zur Ermittlung der Termsymbole werden die Gesamtdrehimpulsquantenzahl L, die Gesamtspinzahl S und die Gesamtdrehimpulsquantenzahl J benötigt, welche wie folgt definiert sind:

$L = (l_1 + l_2 + \dots + l_k), (l_1 + l_2 + \dots + l_{k-1}), (l_1 - l_2 + \dots - l_k)$ mit der Bedingung, daß $l_1 \geq l_2 \geq \dots \geq l_k$ und daß die Reihe höchstens bis $L \geq 0$ fortgesetzt wird.

$S = (s_1 + s_2 + \dots + s_k), (s_1 + s_2 + \dots + s_k) (s_1 - s_2 - \dots - s_k)$, bis herab zu $S = 1/2$, wenn k ungerade bzw. $S = 0$ für k gerade.

Bei den hier betrachteten leichteren 3d-Elementen findet eine starke Kopplung der Elektronenbahnen untereinander und eine starke Kopplung der Spins untereinander statt. Hier führt diese Kopplung zu einem resultierenden Gesamtspin mit der Quantenzahl S und zu einem Gesamtdrehimpuls mit der Quantenzahl L . Diese koppeln zu einem Gesamtdrehimpuls mit der Quantenzahl J . Diese Kopplung wird als (L, S) -Kopplung oder Russell-Saunders-Kopplung bezeichnet und kann bei den betrachteten Werten als gute Näherung verwendet werden.

$$J = (L + S), (L + S - 1), \dots, (L - S) \text{ für } L \geq S$$

$$\text{bzw. } J = (S + L), (S + L - 1), \dots, (S - L) \text{ für } S \geq L$$

Die Spin-Bahn-Kopplung ist hier schwach, anders als z. B. bei den 5f-Elementen, wo diese Näherung keine Gültigkeit mehr hätte, also läßt sich das magnetische Moment aus den Einzeldrehimpulsquantenzahlen S und L berechnen durch

$$\frac{\mu}{\mu_B} = \sqrt{4S(S+1) + L(L+1)}$$

Der Zustand des Atoms wird durch Termsymbole der Form $^{(2S+1)}T_J$ beschrieben, wobei der obere Index die Multiplizität und J die Gesamtdrehimpulsquantenzahl angeben. Der Buchstabe (hier T) gibt die Gesamtdrehimpulsquantenzahl L an. L wird dazu entsprechend der Schale in Buchstaben umgewandelt, analog zu den Orbitalbezeichnungen $L=0$: S; $L=1$: P; $L=2$: D... nur daß hier Gesamtzustände der Ionen betrachtet werden.

Bei der Betrachtung der magnetischen Momente spielen nur unvollständig besetzte Unterschalen eine Rolle, da voll besetzte Unterschalen ein resultierendes magnetisches Moment von 0 haben und damit $L=0$, $S=0$ und $J=0$.

Also sind hier nur die 3d-Elektronen zu betrachten, es ergeben sich folgende Werte:

Ion	$m_l =$	+2	+1	0	-1	-2	$=m_L$	m_S	L	S	J	Term
Ni^{2+}	$(m_S)_1$			+1/2	+1/2	+1/2	-3	-1	3	1	4	3F_4
	$(m_S)_2$	-1/2	-1/2	-1/2	-1/2	-1/2						
Cu^{2+}	$(m_S)_1$		+1/2	+1/2	+1/2	+1/2	-2	-1/2	2	1/2	5/2	$^2D_{5/2}$
	$(m_S)_2$	-1/2	-1/2	-1/2	-1/2	-1/2						
Mn^{2+}	$(m_S)_1$						0	-5/2	0	5/2	5/2	$^6S_{5/2}$
	$(m_S)_2$	-1/2	-1/2	-1/2	-1/2	-1/2						

Die Berechnung der theoretischen magnetischen Momente erfolgt nach der o. a. Formel, es ergibt sich

$$\mu(\text{Ni}^{2+})/\mu_B = \sqrt{20} = 4,47$$

$$\mu(\text{Cu}^{2+})/\mu_B = \sqrt{9} = 3$$

$$\mu(\text{Mn}^{2+})/\mu_B = \sqrt{35} = 5,92$$

Fehlerbetrachtung:

Bei den durchgeführten Messungen gibt es zwei systematische Fehler, die quantitativ nicht erfaßbar sind. Zunächst die Annahme, daß sich das Ende der Probe schon im feldfreien Raum befindet. Hiervon ist nicht auszugehen, da das Magnetfeld recht stark ist und im Vergleich dazu die Probe nur geringe Abmessungen hat. Der zweite Fehler liegt im Aufbau der Probe: Es handelt sich um ein kristallines Pulver, dessen Schichtung alles andere als homogen ist. Durch das Füllen der Kristalle entsteht eine unregelmäßige Materieverteilung, durch die Hohlräume, in denen sich Luft befindet, „fehlt“ an der Stelle natürlich das zu vermessene Material, auch durch Erschütterungen können Risse in der Pulversäule auftreten, die sich natürlich auch auf die Messung auswirken. Trotzdem konnten bei der Ermittlung der Molsuszeptibilitäten recht gute Übereinstimmungen mit den Literaturwerten gefunden werden.

Literatur:

- Praktikumsscript,
- Riedel, Anorganische Chemie, de Gruyter, Berlin **1987**, S. 577-592
- Atkins, Physikalische Chemie, VCH, Weinheim, **1988**, S.373-381