

Versuch Nr. 9
Magnetische Suszeptibilität

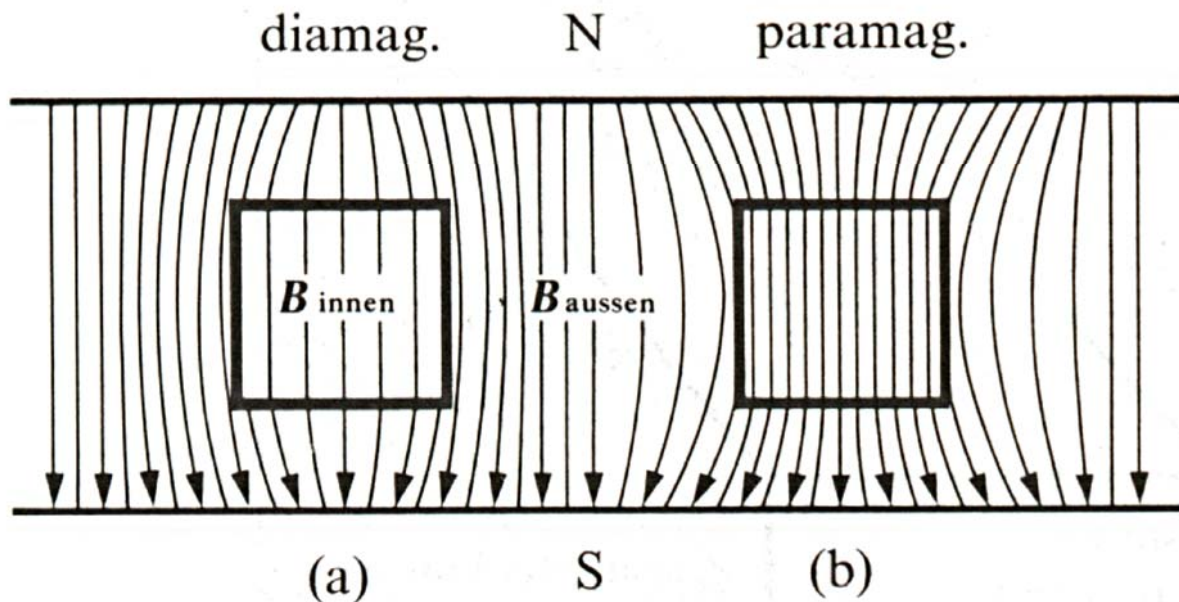
1. Ziel des Versuches

Bei diesem Versuch soll die Suszeptibilität von verschiedenen Komplexsalzen bestimmt werden. Durch Messungen an $\text{AgO}/\text{Ag}_2\text{O}$ soll das Mischungsverhältnis von diesem bestimmt werden. Zusätzlich wird mittels der Suszeptibilität die Reinheit in Y_2O_3 -Proben bestimmt werden.

2. Theorie

2.1 Suszeptibilität

Wenn ein Körper in ein Magnetfeld eingebracht wird, welches die Flussdichte B hat, so können sich die Feldlinien im inneren des Körpers verdichten oder auseinander gedrängt werden. Das verdichten der Feldlinie im Körper nennt man Paramagnetismus, das auseinander drängen Diamagnetismus.



Die Magnetisierung M ist proportional zur magnetischen Feldstärke H . Die Suszeptibilität χ_m ist der Proportionalitätsfaktor.

$$M = \chi_m * H$$

Da die magnetische Suszeptibilität χ_m zwei verschiedene mathematische Vorzeichen haben kann, wird auch der Magnetismus in zwei verschiedene Arten unterteilt.

1. M ist H entgegengerichtet. Daraus folgt das χ_m negativ ist und man spricht von Diamagnetismus.
2. M hat die gleiche Richtung wie H . Hier ist χ_m positiv und man spricht von Paramagnetismus.

Zusätzlich gibt es noch eine Gruppe von Stoffen die sich durch besonders große positive Werte der Suszeptibilität auszeichnet. Dies nennt man Ferromagnetismus.

In Analogie zur magnetischen Suszeptibilität kann man auch über die Proportionalität zwischen der magnetischen Flussdichte und der magnetischen Feldstärke auf das Verhalten von Stoffen im magnetischen Feld schließen.

$$B = \mu_0 * \mu_r * H = \mu * H$$

μ ist die magnetische Permeabilität und μ_r die relative Permeabilität eines Stoffes. Bei diamagnetischen Stoffen ist $\mu_r < 1$ und $\chi_m < 0$. Bei paramagnetischen Stoffen ist $\mu_r > 1$ und $\chi_m > 0$.

$$\begin{aligned} B &= \mu_0(M+H) = \mu_0(H + \chi_m H) \\ &= \mu_0 H(1 + \chi) = \mu H \end{aligned}$$

$$\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} \text{ m * kg * s}^{-2} * \text{A}^{-2}$$

$$\mu = \mu_0(1 + \chi_m)\mu_0\mu_r$$

2.2 Diamagnetismus

Magnetische Momente werden bei Stoffen durch Spin- und Bahndrehmomente der einzelnen Elektronen verursacht. Bei Diamagnetismus kompensieren sich die magnetischen Momente der Spins und der Drehimpulse. Wird ein so ein Stoff in ein magnetisches Feld gebracht, so kommt es zu einem induzierten Strom, an den ein Magnetfeld gekoppelt ist. Aufgrund der Lenz'schen Regel ist dessen magnetisches Moment dem verursachenden Feld entgegengerichtet. Daraus folgt das diamagnetische Substanzen von Magnetfeldern abgestoßen werden.

Da die mittleren Elektronenabstände von der Temperatur unabhängig sind, ist auch die diamagnetische Suszeptibilität temperaturunabhängig.

Der Diamagnetismus ist um mehrere Größenordnungen schwächer als der Paramagnetismus. Diamagnetismus tritt bei allen Stoffen auf.

$$\chi = \chi_{dia} + \chi_{para}$$

Diamagnetisch sind solche Stoffe, welche über eine gerade Anzahl von Elektronen verfügen. Diese sind jeweils mit antiparallelem Spin in den Orbitalen gepaart.

Diamagnetische Stoffe werden von dem Magnetfeld der Gouy-Waage abgestoßen, wodurch sie leichter erscheinen.

2.3 Paramagnetismus

Paramagnetismus tritt immer dann auf, wenn ungepaarte Elektronen vorhanden sind und sich die magnetischen Momente deshalb nicht aufheben. Er kann aber auch bei Stoffen mit einer geraden Anzahl an Elektronen aufgrund der Ligandenfeldaufspaltung auftreten. Hierbei wird zwischen low-spin und high-spin Komplexen unterschieden. Sind kein Anteile des Bahndrehimpulses am gesamten magnetischen Moment vorhanden, so ist die Größe des magnetischen Momentes gegeben durch die Spin-only-Formel.

$$m = \sqrt{n(n+2)} * \mu_B$$

$$\mu_B = \frac{e * h}{4\pi * m_e} = 9,27408 \cdot 10^{-24} J * T^{-1}$$

n = Anzahl der ungepaarten Spins

μ_B = Bohrsche Magneton

e = Elementarladung

h = Plancksches Wirkungsquantum

m_e = Masse eines Elektrons

Paramagnetismus nimmt mit $\frac{1}{T}$ ab, da die gleichmäßige Ausrichtung der Elektronen durch die Temperaturerhöhung erschwert wird.

Die Temperaturabhängigkeit der paramagnetischen Suszeptibilität kann mit Curie-Gesetz

beschrieben $\chi_{para} = \frac{C}{T}$. Da diese Temperaturabhängigkeit nur für Gase gilt, wo die Moleküle

weit genug voneinander entfernt sind, um miteinander in Wechselwirkung zu treten, muß die Gleichung ein kleinwenig geändert werden und man gelangt so zum Curie-Weiss-Gesetz.

$$\chi_{para} = \frac{C}{T - \Theta}$$

$$C = \frac{\mu_0 N_A}{3k} \mu_m^2$$

μ_0 = magnetische Feldkonstante

N_A = Avogadro-Konstante

k = Boltzmann-Konstante

Θ ist die Weissche Konstante und ist für jeden Stoff charakteristisch.

Paramagnetische Stoffe werden bei der Gouy-Waage in das Magnetfeld hinein gezogen, wodurch sie schwerer erscheinen.

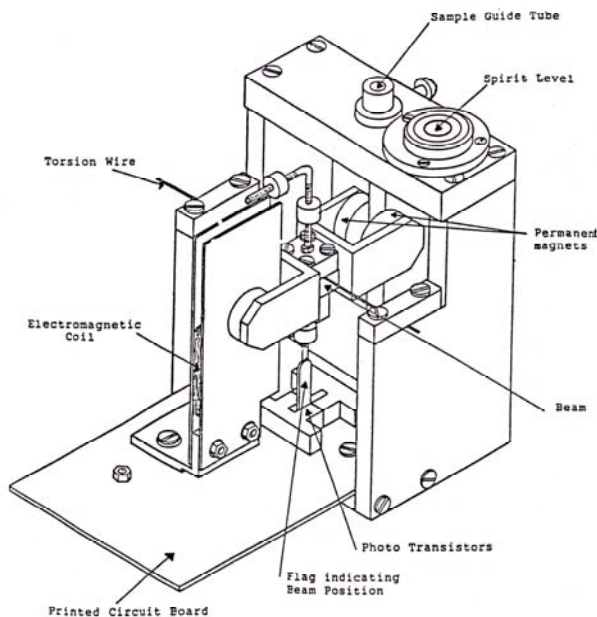
2.4 Ligandenfeldtheorie

Die Theorie der Ligandenfeldaufspaltung dient der Beschreibung der Wechselwirkungen in Komplexen. Bei Übergangsmetall-Ionen besitzen in isolierter Form alle fünf d-Orbitale die gleiche Energie, sie sind entartet. Wenn man nun ein Übergangsmetall-Ion in einem Komplex mit sechs oktaedrisch angeordneten Liganden betrachtet, sind die Orbitale die in $d_{x^2-y^2}$ und d_{z^2} liegen energetisch höher gelegen, da deren Elektronenwolken einer stärkeren Abstoßung unterliegen. Die d_{xy} , d_{xz} und d_{yz} Orbitale unterliegen einer geringeren Abstoßung und sind energetisch günstiger. Das höhere Energieniveau wird als e_g -Orbital bezeichnet und das tiefere Energieniveau bezeichnet man als t_{2g} -Orbital.

Die Größe der Aufspaltung wird mit $10 Dq$ bezeichnet, wobei das tiefere Energieniveau um $4 Dq$ vom Grundzustand erniedrigt ist und das höhere Energieniveau um $6 Dq$ vom Grundzustand aus erhöht ist. Bei 1-3 Elektronen wird das t_{2g} -Orbital entsprechend der Hund'schen Regel aufgefüllt. Bei dem vierten bis siebten Elektron wird beim auffüllen geschaut ob das höhere Orbital oder die Spinpaarungsenergie günstiger ist. Falls die Spinpaarungsenergie günstiger ist entsteht ein low-spin-Komplex. Wenn es energetisch günstiger ist das höhere Orbital zu besetzen entsteht ein high-spin-Komplex. Bei dem 8-10ten Elektron ist wieder nur noch eine Möglichkeit zur Besetzung der Orbitale möglich.

2.5 Funktionsweise der Gouy-Waage

Bei diesem Versuch wurde eine Gouy-Waage benutzt, deren Prinzip leicht abgewandelt ist. Hier wird nicht die Kraft gemessen die ein Magnetfeld auf eine Probe ausübt, sondern die Kraft welche die Probe auf einen Magneten ausübt. Um diese Kraft zu messen ist der Magnet an einem Torsionsdraht aufgehängt. Die Auslenkung des Magneten wird mittels einer Magnetspule ausgeglichen. Der dafür benutzte Strom ist proportional zu der von der Probe ausgeübten Kraft und somit auch zu deren ausgeübten magnetischen Volumenssuszeptibilität χ_v .



Zur Bestimmung der Massenssuszeptibilität gilt:

$$\chi_g = \frac{l * (C * (R - R_0) + 10^9 * \chi_v^{Luft} * A)}{10^9 * m}$$

C = Kalibrierkonstante

R = Messwert des Probenröhrchens mit Probe [cm^{-1}]

R_0 = Messwert des leeren Röhrchens [cm^{-1}]

l = Füllhöhe des Röhrchens [cm]

m = Probenmasse

A = Innenquerschnitt des Probenröhrchens [cm^2]

χ_v^{Luft} = Volumenssuszeptibilität der verdrängten Luft

Für pulverförmige Proben kann der Korrekturterm $10^9 \cdot \chi_v^{Luft} \cdot A$ in der Regel vernachlässigt werden.

Laut der Versuchsvorschrift beträgt $R_0 = -63,3 \text{ cm}^{-1} \pm 1,1 \text{ cm}^{-1}$.

3. Auswertung

3.1 Bestimmung der Kalibrierkonstanten C

R ₁	1037
R ₂	1036
R ₃	1039

Mittelwert	1037,3
Füllhöhe[cm]	2,7±0,1
Masse[g]	0,2046

Der Fehler der Masse wird mit 0 angegeben, da wird den Werten welche auf den Schildchen stehen vertrauen müssen. Die Standardabweichung des Mittelwertes wird nach folgender formel berechnet:

$$\sigma_{R_{\text{mittel}}} = \sqrt{\frac{\sum_i (R - R_{\text{mittel}})^2}{n \cdot (n - 1)}}$$

Daraus ergibt sich für den Mittelwert **R = 1037,3 cm⁻¹ ± 0,882 cm⁻¹**

Die Suszeptibilität wird nach der Gleichung

$\chi_g = \frac{l * (C * (R - R_0))}{10^9 * m}$ berechnet, wobei man die Kalibrierkonstante weg lässt, da sie ja erst ermittelt wird.

Hier heraus ergibt sich für **$\chi_g = 14,53 * 10^{-6} \text{ g}^{-1} \pm 2,905 * 10^{-13} \text{ g}^{-1}$**

Der Fehler der Suszeptibilität ergibt sich nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung durch die Formel:

$$\Delta\chi = \sqrt{\left(\frac{l}{10^9 \cdot m}\right)^2 \cdot \Delta R^2 + \left(\frac{-l}{10^9 \cdot m}\right) \cdot \Delta R_0 + \left(\frac{(R - R_0)}{10^9 \cdot m}\right)^2 \cdot \Delta l^2}$$

Mit den hier ermittelten Werten, ergibt sich für die Kalibrierkonstante **C = 1,132 ± 1,763 * 10⁻³**

$$\Delta C = \sqrt{\left(\frac{-16,44 \cdot 10^{-6} \text{ g}^{-1}}{\chi^2}\right)^2 \cdot \Delta\chi^2}$$

3.2 Auswertung der Suszeptibilitäten verschiedener Salze

Die gemessenen Suszeptibilitäten und die anderen Werte werden zur Vereinfachung in eine Tabelle eingetragen, und die Formeln zu deren Berechnung und der Berechnung deren Fehler werden im nachhinein aufgeführt.

Salz	R ₁ [cm ⁻¹]	R ₂ [cm ⁻¹]	R ₃ [cm ⁻¹]
Ni(NH ₃) ₆ Cl ₂	460 ± 1	462 ± 1	462 ± 1
K ₂ Cr ₂ O ₇	-60 ± 1	-60 ± 1	-60 ± 1
K ₃ Co(CN) ₆	-85 ± 1	-85 ± 1	-86 ± 1
NiCl ₂ · 6H ₂ O	1344 ± 2	1348 ± 2	1350 ± 2
K ₄ Fe(CN) ₆ · 3H ₂ O	-88 ± 1	-87 ± 1	-87 ± 1
KMnO ₄	-43 ± 1	-44 ± 1	-44 ± 1
(NH ₄) ₂ Fe(SO ₄) ₂ · 6H ₂ O	1571 ± 2	1576 ± 2	1575 ± 2
K ₃ Fe(CN) ₆	246 ± 1	246 ± 1	247 ± 1
Cu(Oac) ₂ · H ₂ O	142 ± 1	143 ± 1	143 ± 1

Salz	m[g]	l[cm]	R _{mittel} [cm ⁻¹]	χ[g ⁻¹]
Ni(NH ₃) ₆ Cl ₂	0,0956	2,7 ± 0,1	461,3 ± 0,666	1,677*10 ⁻⁵ ± 3,894 * 10 ⁻¹³
K ₂ Cr ₂ O ₇	0,2189	3,3 ± 0,1	-60 ± 0	5,971*10 ⁻⁸ ± 7,862 * 10 ⁻¹⁶
K ₃ Co(CN) ₆	0,1761	3,7 ± 0,1	-85,3 ± 0,333	-5,191*10 ⁻⁷ ± 1,718 * 10 ⁻¹⁵
NiCl ₂ · 6H ₂ O	0,1591	1,8 ± 0,1	1347 ± 1,764	1,806*10 ⁻⁵ ± 1,009 * 10 ⁻¹²
K ₄ Fe(CN) ₆ · 3H ₂ O	0,1679	2,6 ± 0,1	-87,3 ± 0,333	-4,177*10 ⁻⁷ ± 1,085 * 10 ⁻¹⁵
KMnO ₄	0,2348	3,2 ± 0,1	-43,6 ± 0,333	3,059*10 ⁻⁷ ± 7,315 * 10 ⁻¹⁶
(NH ₄) ₂ Fe(SO ₄) ₂ · 6H ₂ O	0,1506	3,7 ± 0,1	1574 ± 1,528	4,553*10 ⁻⁵ ± 1,524 * 10 ⁻¹²
K ₃ Fe(CN) ₆	0,1386	2,7 ± 0,1	246,3 ± 0,333	6,830*10 ⁻⁶ ± 6,542 * 10 ⁻¹⁴
Cu(Oac) ₂ · H ₂ O	0,1751	3,2 ± 0,1	142,6 ± 0,333	4,264*10 ⁻⁶ ± 1,895 * 10 ⁻¹⁴

Die Standardabweichung der Mittelwerte wird nach der gleichen Formel aus 4.1 berechnet. Die Suszeptibilität wird ebenfalls nach der Formel aus 4.1 berechnet. Die Fehler der Suszeptibilität berechnet man durch Gaußsche Fehlerfortpflanzung durch die Gleichung:

$$\Delta\chi = \sqrt{\left(\frac{l \cdot C}{10^9 \cdot m}\right)^2 \cdot \Delta R^2 + \left(\frac{-l \cdot C}{10^9 \cdot m}\right)^2 \cdot \Delta R_0^2 + \left(\frac{(R - R_0) \cdot l}{10^9 \cdot m}\right)^2 \cdot \Delta C^2 + \left(\frac{C \cdot (R - R_0)}{10^9 \cdot m}\right)^2 \cdot \Delta l^2}$$

In die nachfolgende Tabelle werden die gefundenen Literaturwerte, die molaren Massen und die in Grammsuszeptibilität umgerechneten Literaturwerte eingetragen. Dies lässt sich einfach umrechnen indem man einfach die Molsuszeptibilität durch die molare Masse teilt.

Salz	Literaturwert für χ in mol ⁻¹	Molare Masse in g * mol ⁻¹	Literaturwert umgerechnet in g ⁻¹
Ni(NH ₃) ₆ Cl ₂	0,003856	158,034	2,44*10 ⁻⁵
K ₂ Cr ₂ O ₇	0,0000294	231,783	1,268*10 ⁻⁷
K ₃ Co(CN) ₆	-0,0001203	237,691	-5,061*10 ⁻⁷
NiCl ₂ · 6H ₂ O	0,00424	332,324	1,276*10 ⁻⁵
K ₄ Fe(CN) ₆ · 3H ₂ O	-0,0001723	199,65	-8,630*10 ⁻⁷
KMnO ₄	0,00002	294,185	6,798*10 ⁻⁸
(NH ₄) ₂ Fe(SO ₄) ₂ · 6H ₂ O	0,0124	476,434	2,603*10 ⁻⁵
K ₃ Fe(CN) ₆	0,00229	329,244	6,955*10 ⁻⁶
Cu(Oac) ₂ · H ₂ O	0,00087	392,139	2,219*10 ⁻⁶

Negative Suszeptibilitäten, und damit ein Diamagnetischer Stoff ist zum einen K₃Co(CN)₆ und zu anderen K₄Fe(CN)₆ * 3H₂O. Dies stimmt genau mit der Ligandenfeldtheorie überein. Denn Cyanid als Ligand bewirkt eine große Aufspaltung des hier oktaedrischen Ligandenfelds und somit ist die Spinpaarung in den niedrig liegenden t_{2g} Orbitalen bevorzugt. Aufgrund der Elektronenkonfiguration im Eisen(II) und Cobalt(III) mit jeweils d⁶- Elektronen kommt es, dass die drei t_{2g}- Orbitale mit sechs Elektronen komplett gefüllt sind und der Stoff diamagnetisch ist.

Wenn man das K₃Fe(CN)₆ betrachtet, ist auch hier von einem oktaedrischen low-spin Komplex auszugehen. Doch da dem Eisen(III) nur fünf Elektronen zur Verfügung stehen kann der t_{2g}- Zustand nicht komplett gefüllt werden und man bekommt ein ungepaartes Elektron. Der Stoff ist paramagnetisch.

Eisen(II) und Eisen(III) kommen überwiegend als oktaedrische high-spin Komplexe vor außer, wie schon gesehen, bei Liganden mit großer Ligandenfeldaufspaltung. Deshalb gilt für das (NH₄)₂Fe(SO₄)₂ * 6H₂O, dass wegen der kleinen Aufspaltung der Liganden die Elektronen nach der Hundt'schen Regel auf die Orbitale des t_{2g}- und des e_g- Zustands gleichmäßig verteilt werden. Dies hat zur folge, dass vier von sechs Elektronen ungepaart sind und so ein starker Paramagnetismus hervorgerufen wird.

Ähnliches gilt für die beiden Nickel(II)- Verbindungen Ni(NH₃)₆Cl₂ und NiCl₂ * 6H₂O, bei denen das Nickel in einer d⁸- Konfiguration vorliegt. Die Elektronen werden auf alle Orbitale gleichmäßig verteilt und man bekommt zwei ungepaarte Elektronen, die das paramagnetische Moment hervorrufen.

Entgegen der Erwartung liegen bei K₂Cr₂O₇ und KMnO₄, trotz der höchsten Oxidationsstufe kein Diamagnetismus vor. Beide weisen ein schwaches paramagnetisches Moment auf.

Erklärbar ist dieses Verhalten, wenn man sich vor Augen führt, dass der gebundene Sauerstoff eine große Elektronendichte, und das Metall leere Orbitale besitzt. Es kommt zur Verschiebung der Elektronendichte vom Liganden zum Komplexzentrum. Diesen Vorgang nennt man charge-transfer und er bewirkt eine intensive Färbung.

Beim Cu(OAc) * H₂O wurde ebenfalls ein Paramagnetismus gemessen, der aber hier aus der Elektronenzahl des Kupfers ergibt. Kupfer besitzt mit seiner 4s¹3d¹⁰ elf Elektronen. Hier liegt Kupfer(II) vor. Folglich verfügt das Kupfer nur noch über neun Elektronen und ist somit zwangsweise paramagnetisch.

3.3 Bestimmung des Mischungsverhältnisses einer AgO/Ag₂O Mischung

Es wurde die Suszeptibilität der im Praktikum ausliegenden Probe gemessen, und daraus das Mischungsverhältnis der Probe bestimmt.

Die Suszeptibilität und die Fehler wurden genauso wie im vorherigen Versuchsteil berechnet.

Salz	R ₁ [cm ⁻¹]	R ₂ [cm ⁻¹]	R ₃ [cm ⁻¹]
AgO/Ag ₂ O	-84 ± 1	-85 ± 1	-85 ± 1

Salz	m[g]	l[cm]	R _{mittel} [cm ⁻¹]	χ[g ⁻¹]
AgO/Ag ₂ O	0,2395	2,7 ± 0,1	-84,7 ± 0,333	-3,0005*10 ⁻⁷ ± 6,408 * 10 ⁻¹⁶

Die Literaturwerte und in Grammsuszeptibilität umgerechneten Literaturwerte betragen:

Salz	Suszeptibilität in mol ⁻¹	Molare Masse in g * mol ⁻¹	Suszeptibilität in g ⁻¹
Ag ₂ O	-134*10 ⁻⁶	231,736	-5,782*10 ⁻⁷
AgO	-19,6*10 ⁻⁶	128,868	-1,544*10 ⁻⁷

Bei der Berechnung der Suszeptibilität muß man einfach ein Gleichungssystem lösen.

$$m \cdot \chi = m(\text{Ag}_2\text{O}) \cdot \chi(\text{Ag}_2\text{O}) + m(\text{AgO}) \cdot \chi(\text{AgO})$$

m = Masse der Probe

m(Ag₂O) = Masse an Ag₂O

m(AgO) = Masse an AgO

χ = gemessene Suszeptibilität

χ(Ag₂O) = Literaturwert für Ag₂O

χ(AgO) = Literaturwert für AgO

Dieses Gleichungssystem hat im Prinzip zwei Unbekannte, und zwar die Massen an Ag₂O und AgO. Da aber die beiden Massen addiert die Masse der Probe ergeben müssen kann man die eine Masse durch die Gesamtmasse subtrahiert der anderen Masse ersetzen.

$$m(\text{Ag}_2\text{O}) = m - m(\text{AgO})$$

wenn man diese Gleichung oben einsetzt und nach der Masse von AgO umstellt erhält man die Masse von AgO.

$$m(\text{AgO}) = m \cdot \frac{(\chi - \chi(\text{Ag}_2\text{O}))}{(\chi(\text{AgO}) - \chi(\text{Ag}_2\text{O}))}$$

wenn man alle Werte einsetzt erhält man für die Masse an AgO:

$$m(\text{AgO}) = 0,1572 \text{ g} \pm 3,62 \cdot 10^{-10} \text{ g}$$

dadurch kann man auch die Masse an Ag₂O ausrechnen.

$$m(\text{Ag}_2\text{O}) = 0,0823 \text{ g} \pm 3,62 \cdot 10^{-10} \text{ g}$$

Der Fehler wurde wieder durch Gaußsche Fehlerfortpflanzung berechnet.

Da nur χ mit einem Fehler behaftet ist ergibt sich die für den Fehler der Masse von AgO die einfache Formel:

$$\Delta m(\text{AgO}) = \frac{m}{\chi(\text{AgO}) - \chi(\text{Ag}_2\text{O})} \cdot \Delta \chi$$

Da man die Masse von Ag₂O durch Subtraktion von der Gesamtmasse erhält hat sie natürlich den selben Fehler.

Dadurch ergibt sich ein Mischungsverhältnis von:

$$m(\text{AgO}) = 65,63\%$$

$$m(\text{Ag}_2\text{O}) = 34,37\%$$

Man kann noch über die Molaren Massen eine Stoffmenge ausrechnen.

$$n(\text{AgO}) = 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \pm 2,809 \cdot 10^{-12} \text{ g}$$

$$n(\text{Ag}_2\text{O}) = 3,55 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \pm 1,562 \cdot 10^{-12} \text{ g}$$

Die Fehler der Stoffmenge berechnen sich nach der Gleichung:

$$\Delta n = \frac{\Delta m}{M}$$

Δn Fehler der Stoffmenge

Δm Fehler der Masse

Die Probenzusammensetzung ist also durch das Mischungsverhältnis

$$n(\text{AgO}):n(\text{Ag}_2\text{O}) = 3,44 : 1 \text{ gegeben.}$$

3.4 Bestimmung der Reinheit von Y_2O_3 -Proben

Die gemessenen Werte werden wieder zur besseren Übersicht in einer Tabelle eingetragen, und die Erklärungen später gegeben. Die einzelnen Messwerte werden diesmal weggelassen, und direkt die gemittelten Werte eingetragen. Die einzelnen Werte können bei Bedarf dem Messprotokoll entnommen werden.

Probe Y_2O_3	Masse [g]	l[cm]	R_{mittel} [cm^{-1}]	χ [g^{-1}]
hochrein	0,1059	$2,2 \pm 0,1$	-75 ± 0	$-1,76 \cdot 10^{-6} \pm 1,64 \cdot 10^{-15}$
technisch	0,2506	$2,2 \pm 0,1$	$-79,67 \pm 0,333$	$-7,91 \cdot 10^{-7} \pm 3,19 \cdot 10^{-16}$
P2	0,1802	$2,5 \pm 0,1$	$-33,67 \pm 0,333$	$-5,29 \cdot 10^{-7} \pm 1,01 \cdot 10^{-16}$
P3	0,2145	$2,4 \pm 0,1$	$-19,3 \pm 0,333$	$-2,45 \cdot 10^{-7} \pm 9,75 \cdot 10^{-16}$
P4	0,2396	$2,8 \pm 0,1$	$-26 \pm 0,577$	$-3,44 \cdot 10^{-7} \pm 7,85 \cdot 10^{-16}$
P5	0,2195	$2,7 \pm 0,1$	$29,67 \pm 0,333$	$4,13 \cdot 10^{-7} \pm 2,83 \cdot 10^{-16}$
P6	0,1961	$2,6 \pm 0,1$	$-56,67 \pm 0,333$	$-8,50 \cdot 10^{-7} \pm 6,21 \cdot 10^{-16}$

Die Berechnung der Mittelwerte, Standardabweichungen der Mittelwerte, Suszeptibilitäten und Fehler der Suszeptibilitäten erfolgt analog den anderen Aufgaben.
In der Praktikumsvorschrift ist die magnetische Suszeptibilität des Präsodymiumsulfat mit $-4760 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ angegeben, dies kann nicht stimmen, da Präsodymiumsulfat paramagnetisch sein soll. Deshalb wird bei diesem Wert ein positives Vorzeichen genommen.

Die Verunreinigung an Präsodymiumsulfat kann analog wie im vorangegangenen Aufgabenteil erledigt werden.

$$m(\text{Probe}) \cdot \chi(\text{Probe}) = m(Y_2O_3) \cdot \chi(Y_2O_3) + m(\text{Pr}_2(SO_4)_3) \cdot \chi(\text{Pr}_2(SO_4)_3)$$

wenn man die Masse des Y_2O_3 durch die Gesamtmasse minus der Masse von Präsodymiumsulfat ersetzt, und die Gleichung umstellt, erhält man direkt die Masse des Präsodymiumsulfat mit dem die Probe verunreinigt ist.

$$m(\text{Pr}_2(SO_4)_3) = m(\text{Probe}) \cdot \frac{(\chi(\text{Probe}) - \chi(Y_2O_3))}{(\chi(\text{Pr}_2(SO_4)_3) - \chi(Y_2O_3))}$$

Der Fehler der Masse an Präsodymiumsulfat berechnet sich nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung:

$$\Delta m(\text{Pr}_2(SO_4)_3) = \sqrt{\left(\frac{m(\text{Probe})}{(\chi(\text{Pr}_2(SO_4)_3) - \chi(Y_2O_3))} \right)^2 \cdot \Delta \chi(\text{Probe}) + \left(\frac{-m(\text{Probe})}{(\chi(\text{Pr}_2(SO_4)_3) - \chi(Y_2O_3))} + m(\text{Probe}) \cdot \left(\frac{(\chi(\text{Probe}) - \chi(Y_2O_3))}{(\chi(\text{Pr}_2(SO_4)_3) - \chi(Y_2O_3))^2} \right) \right)^2 \cdot \Delta \chi(Y_2O_3)}$$

Die Ergebnisse werden in die Tabelle eingetragen, und die Verunreinigung an $\text{Pr}_2(SO_4)_3$ in Massenprozent der Gesamtmasse wiedergegeben.

	Verunreinigung[g]	Fehler [g]	Verunreinigung[%]	Fehler [%]
technisch	5,78E-06	0,012714085	0,002305506	5,073457897
P2	2,79655E-05	0,010179613	0,015519166	5,649063604
P3	3,73824E-05	0,01206437	0,017427703	5,624415032
P4	3,85703E-05	0,013170898	0,016097771	5,497035897
P5	7,22685E-05	0,014112298	0,032924155	6,429293025
P6	1,53614E-05	0,010534142	0,007833431	5,371821591

Die prozentuale Verunreinigung wurde errechnet durch die Gleichung:

$$\text{Verunreinigung} = m(\text{Pr}_2(SO_4)_3) / m(\text{Probe}) \cdot 100$$

Für den Fehler der prozentualen Verunreinigung wurde statt der Masse an $\text{Pr}_2(SO_4)_3$ der Fehler der Masse $\text{Pr}_2(SO_4)_3$ eingesetzt.

3.5 Messung der Suszeptibilität von KCl

Für die Messung von KCl wurde erst mal eine neue Kalibrierkonstante bestimmt, da diesmal andere Rörchen benutzt wurden.

Dazu war ein Rörchen der selben Art mit einer Standardlösung gefüllt. Der Messwert ist so eingestellt das gilt $R_{\text{Standard}} - R_0 = 1000$

Bei der Kalibrierung wurden erhalten für R: 1027, 10245, 1025

Der Mittelwert beträgt hierbei $R_{\text{mittel}} = 1025,3 \pm 0,882$

Die Standardabweichung des Mittelwertes wurde dabei wie in 3.1 bestimmt.

Als Kalibrierkonstante erhält man:

$$C = 1000/[1025,3 - (-33)]$$

$$C = 0,945 \pm 0,0018898$$

Nun haben wir ein leeres Probenrörchen gemessen, und erhielten dabei einen R_0 -Wert von $-63,5 \text{ cm}^{-1} \pm 1$

Danach wurde das Probenrörchen gefüllt, die Füllhöhe bestimmt und die Masse der Probe gewogen.

Die Probenmasse beträgt: $m = 0,1660 \text{ g} \pm 0,0002 \text{ g}$

Die Füllhöhe betrug $l = 2,1 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ cm}$

Für R erhielten wir: 32, 37, 36, 37

Den Fehler von R ist 1.

Nun kann man die Suszeptibilität des Salzes berechnen:

$$\chi = \frac{(R - R_0) \cdot l \cdot C}{10^9 \cdot m}$$

$$\chi = 1,18 \cdot 10^{-6}$$

Der Literaturwert beträgt $-38,8 \cdot 10^{-6} \text{ mol}^{-1}$ also $-5,204 \cdot 10^{-7} \text{ g}^{-1}$

Fehlerbetrachtung

Fehler sind im Versuch dadurch zustande gekommen, das die Waage sehr stoßempfindlich ist, und der Versuch nebenan eine dauernd laufende Vakuumpumpe benötigt die gestört haben könnte. Zusätzlich können auch die Bewegungen der anderen Praktikumsteilnehmer störend auf den Versuch eingewirkt haben da jede Bewegung eine Schwankung auf der Waage verursacht hat. Weiterhin können Fehle durch die Füllhöhenmessung, zustande kommen, falls das Rörchen nicht homogen gefüllt ist. Weitere Fehler sind z.B. wenn das Salz mit Luftsauerstoff, der ja eigentlich nicht vorhanden sein dürfte, da sie ja im Vakuum eingeschweißt sind, reagiert, wie es im Fall der Oxidation von KMnO_4 zu Braunstein anzutreffen ist, oder bei Versuchsteil 5 Fehler beim wiegen der Masse, oder unreines KCl.