

V606

# **Messung der Suszeptibilität paramagnetischer Substanzen**

Evelyn Romanjuk  
evelyn.romanjuk@tu-dortmund.de

Ramona-Gabriela Kallo  
ramonagabriela.kallo@tu-dortmund.de

Durchführung: 08.05.18

Abgabe: 15.05.18

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Berechnung der Suszeptibilität . . . . .	3
2.2 Messung der Suszeptibilität . . . . .	6
<b>3 Aufbau und Durchführung</b>	<b>7</b>
<b>4 Auswertung</b>	<b>9</b>
4.1 Untersuchung der Filterkurve des Selektivverstärkers . . . . .	9
4.2 Theoretische Bestimmung der Suszeptibilität . . . . .	11
4.3 Experimentelle Bestimmung der Suszeptibilität über die Widerstandsdifferenz	12
<b>5 Diskussion</b>	<b>13</b>
<b>Literatur</b>	<b>14</b>

# 1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll die Suszeptibilität von Oxiden einiger Seltener-Erd-Elemente näher untersucht und anschließend die Ergebnisse mit den theoretischen Werte verglichen werden.

## 2 Theorie

### 2.1 Berechnung der Suszeptibilität

Für die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  und die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  im Vakuum gilt

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (1)$$

wobei  $\mu_0$  die Induktionskonstante ist. Die Flussdichte hängt unter anderem auch von der Magnetisierung  $\vec{M}$  der im Feld vorhandener Materialien ab. Die Magnetisierung  $\vec{M}$  wird auch unter anderem durch magnetische Momente hervorgerufen und hängt von der magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$  ab. Die Gleichung 1 wird ergänzt durch die Magnetisierung  $\vec{M}$  und es gilt:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}. \quad (2)$$

Für die Magnetisierung wird die folgende Beziehung gegeben:

$$\vec{M} = \mu_0 \chi \vec{H} \quad (3)$$

die dann in der Gleichung 2 eingesetzt wird und schließlich ergibt sich:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H}$$

wobei die Größe  $\chi$  die sogenannte Suszeptibilität ist. Die Suszeptibilität ist eine materialabhängige Größe, die zusätzlich von der Temperatur und der Feldstärke abhängen kann.

Das hier betrachtete Phänomen des Paramagnetismus entsteht nicht bei jedem Material und ist nicht bei jedem Material zu beobachten. Dieser wird nur bei solchen Materialien beobachtet, deren Drehimpuls nicht verschwinden kann. Es entsteht in Materialien deren Atome einen magnetischen Moment zu einem äußeren Feld besitzen. Der Paramagnetismus ist temperaturabhängig, weil die Orientierung der magnetischen Momente durch die thermische Bewegung der Atome dauerhaft geändert wird.

Im Folgenden soll ein Zusammenhang zwischen dem Drehimpuls und dem magnetischen Moment betrachtet werden. Der Gesamtdrehimpuls  $\vec{J}$  ist eine quantenmechanische Größe, die mit dem Gesamtdrehimpuls der Elektronen und deren Spins zusammenhängt, wobei dieser hier vernachlässigt wird. Es folgt nun:

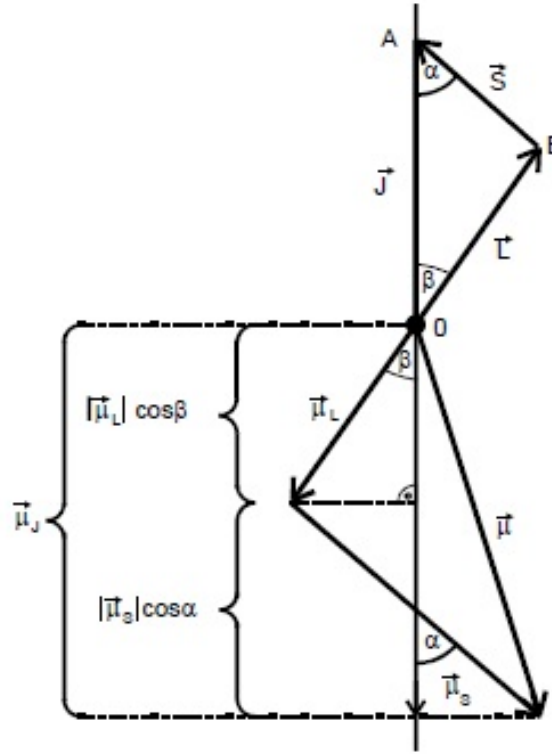
$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S},$$

wobei  $\vec{L}$  und  $\vec{S}$  die Vektorsumme der Einzeldrehimpulse der Elektronen sind. Aus der Quantenmechanik ergibt sich:

$$\vec{\mu}_L = -\frac{\mu_B}{\hbar} \vec{L}$$

$$\vec{\mu}_S = -g_S \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{S}$$

wobei  $\mu_B$  das Bohrsche Magneton und  $g_S$  das gyromagnetische Verhältnis sind.



**Abbildung 1:** Vektordarstellung der Drehimpulse in einer Elektronenhülle und der magnetischen Momente, [1, S. 3].

In diesem Fall werden die Beträge der magnetischen Momente betrachtet und mit Hilfe der Beziehung:

$$|\vec{J}| = \sqrt{J(J+1)}\hbar,$$

die bei den anderen Drehimpulsen auch analog gilt, ergeben sich die folgenden Ausdrücke für die magnetischen Momente:

$$|\vec{\mu}_L| = \mu_B \sqrt{L(L+1)} \quad (4)$$

$$|\vec{\mu}_S| = g_S \mu_B \sqrt{S(S+1)}. \quad (5)$$

Mit Hilfe der Beziehung aus den Gleichungen 4 und aus der Abbildung 1 ergibt sich der folgende Ausdruck für  $|\vec{\mu}_J|$ :

$$|\vec{\mu}_J| = |\vec{\mu}_S| \cos \alpha + |\vec{\mu}_L| \cos \beta.$$

Es wird angenommen, dass das gyromagnetische Verhältnis den Wert 2 hat. Mit dieser Näherung lässt sich das magnetische Moment des Gesamtdrehimpulses zu:

$$|\vec{\mu}_J| \approx \mu_B \sqrt{J(J+1)} \frac{3J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (6)$$

vereinfachen. Aus der Gleichung 6 wird der letzte Teilausdruck:

$$g_J = \frac{3J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (7)$$

als Landé-Faktor bezeichnet. Ein weiteres Phänomen der Quantenmechanik ist die Richtungsquantelung. Die Richtungsquantelung ist die Tatsache, dass der Winkel zwischen einer beliebigen gewählten Richtung des äußeren Feldes und der Lage von  $|\vec{\mu}_J|$  nicht beliebig sein kann. Es gilt für die Z-Komponente der folgende Ausdruck:

$$\mu_{J_z} = -\mu_B g_J m \quad (8)$$

wobei  $m$  die Orientierungsquantenzahl ist. Der Winkel kann daher nur  $2J+1$  Einstellungsmöglichkeiten annehmen. Für jede mögliche Einstellung wird eine potentielle Energie angegeben, mit welcher die Magnetisierung  $\vec{M}$  bestimmt werden kann. Die potentielle Energie ist gegeben als:

$$E_m = -\vec{\mu}_J \vec{B} = \mu_B g_J m B.$$

Die Aufspaltung der Spektrallinien in  $2J+1$  unter dem Einfluss eines äußeren Magnetfeldes wird als *Zeeman – Effekt* bezeichnet. Hier muss die Häufigkeit der bestimmten Orientierungen des magnetischen Momente berechnet werden, diese mit dem Betrag des zugehörigen magnetischen Momentes aus der Gleichung 8 multipliziert und anschließend über alle vorkommende Orientierungen summiert. Mit verschiedenen Näherungen und quantenmechanischen Betrachtungen lässt sich ein Ausdruck für  $\chi$  herleiten.

Das sogenannte *Curie – Gesetz* lautet:

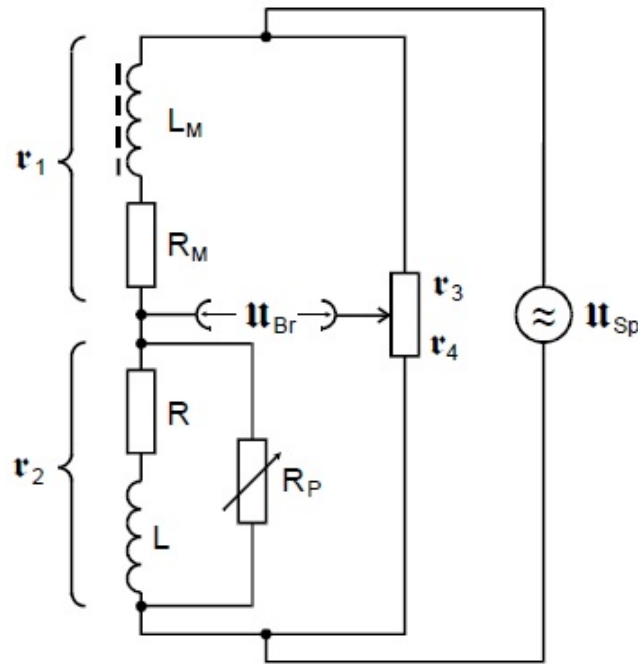
$$\chi = \frac{\mu_0 \mu_B^2 g_J^2 N J(J+1)}{3kT} \quad (9)$$

wobei  $k$  die Boltzmann-Konstante,  $T$  die Temperatur und  $N$  die Anzahl der Momente pro Volumeneinheit sind. Für hohe Temperaturen ist die Suszeptibilität  $\chi$  proportional zu  $\frac{1}{T}$ .

Der Paramagnetismus wird insbesondere bei Ionen Seltener Erden beobachtet, die durch 4f-Elektronen entstehen. Aus der Gleichung 9 lässt sich erschließen, dass die inneren Elektronen große Drehimpulse besitzen. Um die Anordnung der Elektronen in der 4f-Schale und der sich daraus ergebende Gesamtdrehimpuls zu verstehen, werden die Hundschen Regeln einige Erklärungen dafür liefern.

- Der Gesamtspin  $\vec{S}$  nimmt den maximal möglichen Wert an, die Spins der einzelnen Elektronen  $\vec{s}_i$  stehen also möglichst parallel.
- Wenn eine Schale höchstens zur Hälfte gefüllt ist, dann ist der Gesamtdrehimpuls  $\vec{J} = \vec{L} - \vec{S}$ , bei mehr als die Hälfte ist es umgekehrt,  $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$ .
- Der Drehimpuls  $\vec{L} = \sum \vec{l}_i$  nimmt die größtmögliche Summe an, wenn die Bahndrehimpulse  $\vec{l}_i$  unter Berücksichtigung des Pauli-Prinzips und der ersten Regel bilden können.

## 2.2 Messung der Suszeptibilität



**Abbildung 2:** Brückenschaltung für die Messung der Suszeptibilität, [1, S. 8].

Für die tatsächliche Messung von  $\chi$  wird eine Brückenschaltung wie in der Abbildung 2 mit zwei Induktivitäten benutzt. Mithilfe der Schaltung wird die Induktivität der Spule gemessen in der das zu untersuchende Material liegt.

Aus der Induktivität wird die Suszeptibilität  $\chi$  bestimmt:

$$L_M = \mu_0 \frac{n^2 F}{l} + \chi \mu_0 \frac{n^2 Q}{l} \quad (10)$$

wobei  $n$  die Windungszahl,  $l$  die Länge,  $F$  den Querschnitt der Spule und  $Q$  die Querschnittsfläche der Probe sind. Der letzte Term in der Gleichung 10 ist Induktivitätsdifferenz  $\Delta L$  zwischen materiegefüllten und Luftspulen. Zur Messung der Suszeptibilität  $\chi$  gibt es zwei verschiedene Methoden. Zum einen wird die Brücke abgeglichen und die zu gehörende Spule mit dem zu untersuchenden Material der Suszeptibilität  $\chi$  gefüllt, so kann

die Suszeptibilität  $\chi$  aus der Brückenschaltung errechnet werden. Die Brückenspannung ergibt sich nach Kirchhoff zu:

$$U_{\text{Br}} = \frac{r_1 r_4 - r_3 r_2}{(r_1 + r_2)(r_3 + r_4)} U_{\text{Sp}}.$$

Es folgt direkt die Abgleichsbedingung für die Brückenspannung:

$$r_1 r_4 = r_3 r_2.$$

Der Widerstand  $r_1$  ist bedingt durch die Induktion der Spule durch:

$$r_1 = R_{\text{M}} + j\omega L_{\text{M}}.$$

Mit der Näherung  $R_{\text{p}} \gg R$  und  $R_{\text{p}} \gg \omega L$  ergibt sich  $r_2$  zu:

$$r_2 \approx R + j\omega L.$$

Für sehr hohe Frequenzen  $\omega^2 L^2 \gg R^2$  wird die Suszeptibilität nach mehreren Näherungen und Umformungen vereinfacht zu:

$$\chi(\omega \rightarrow \infty) = 4 \frac{F U_{\text{Br}}}{Q U_{\text{Sp}}} \quad (11)$$

wobei  $U_{\text{Sp}}$  die Speisespannung ist. Zum anderen wird nach dem Abgleichen der Brücke die Spule mit Material gefüllt und die Brücke erneut abgeglichen. Der Widerstand  $r_3$  muss also angepasst werden um wieder eine ausgeglichene Brücke zu erhalten:

$$r'_3 = r_3 + \Delta r.$$

Aus den neuen Abgleichsbedingungen ergibt sich die folgende Formel:

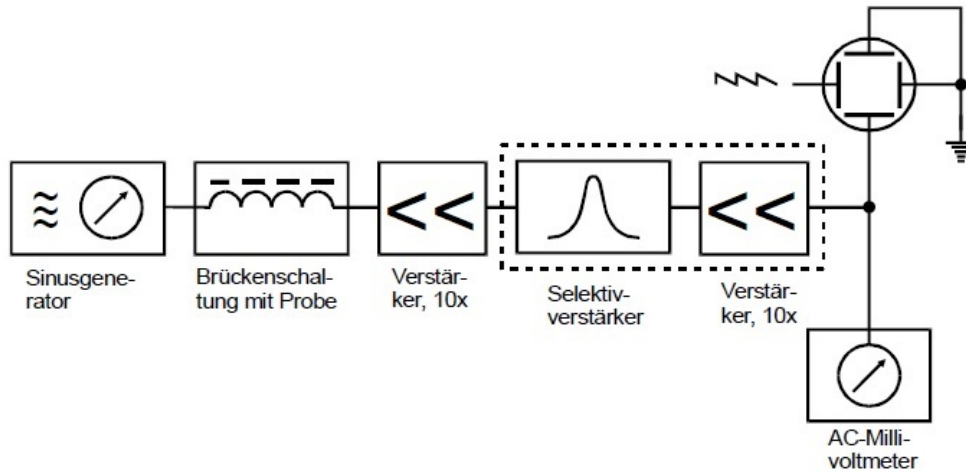
$$\chi = 2 \frac{\Delta R}{R_3} \frac{F}{Q} \quad (12)$$

wobei  $R_3$  der Widerstand am Potentiometer ist und  $\Delta R$  die Differenz der Einstellungen an diesem.

### 3 Aufbau und Durchführung

Für die Messung der Suszeptibilität wird den Aufbau in der Abbildung 3 verwendet. Weil es sich um eine Brückenschaltung handelt, tritt das Problem auf, dass es immer eine Störspannung an den Ausgängen gibt, die dann die Brückenspannung komplett überdeckt. Um Störspannung zu vermeiden, wird ein Selektivverstärker verwendet, welcher einerseits nur monofrequente Signalspannungen durchlässt und andererseits die Brückenspannung verstärkt.

Es wird ein Linearverstärker genutzt um die Spannungsänderungen meßbar zu machen. Zunächst wird die Filterkurve des Selektivfilters gemessen. Dazu wird die Spannungsquelle



**Abbildung 3:** Schematischer Versuchsaufbau mit den Verstärkern, [1, S. 12].

direkt mit dem Selektivverstärker verbunden und auf eine feste Spannung und Frequenz eingestellt. Die resultierende Ausgangsspannung  $U_A$  bei veränderlicher Spannungsfrequenz wird mit Hilfe von Millivoltmeter abgelesen, gemessen und notiert. Außerdem wird im Bereich von 25 kHz bis 30 kHz und von 40 kHz bis 35 kHz die zu suchende Frequenz auch gemessen und notiert. Zusätzlich wird die Frequenz in der Nähe des Maximumbereichs in 0,1 kHz Schritten gemessen und außerhalb in größeren Schritten.

Im nächsten Versuchsanteil soll nun die Suszeptibilitätsmessung erfolgen. Zuerst wird die Signalfrequenz auf die Durchlassfrequenz des Selektivverstärkers eingeregelt. Die experimentelle Bestimmung erfolgt über zwei Methoden: zum einen über die Änderung der Brückenspannung gegenüber der ohne Probe abgeglichenen Brücke und zum anderen über die Widerstandsdifferenz der abgeglichenen Brücke ohne und mit Probe. Ohne Probe wird die Brückenschaltung mit den beiden Abstimmelementen  $\frac{R_3}{R_4}$  und  $R_P$  abgeglichen und danach die beiden Werte aufgeschrieben. Nun wird die Probe in die Spule eingeschoben und erneut die beiden Abstimmelemente notiert. So dann wird noch einmal die Brücke abgeglichen und die neuen sich eingestellten Werte notiert. Das Verfahren wird nun 3 mal für jeweils 3 Proben durchgeführt und zwar für:  $Nd_2O_3$ ,  $Gd_2O_3$  und  $Dy_2O_3$ . Pro Probe und Messreihe werden circa 12 Messwerte aufgeschrieben. Anschließend werden die Länge  $l$  und die Masse  $m$  der Proben notiert.



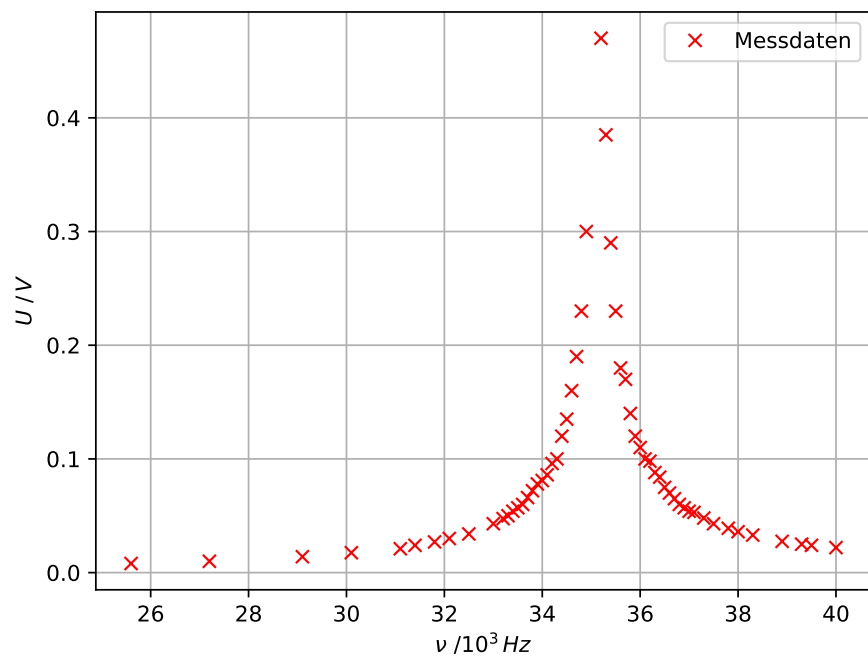
## 4 Auswertung

### 4.1 Untersuchung der Filterkurve des Selektivverstärkers

Die zur Untersuchung der Filterkurve des Selektivverstärkers aufgenommenen Messwerte sind in Tabelle 1 zu finden. Die Filterkurve selbst ist in Abbildung 4 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass das Maximum der Kurve 0,47 V bei einer Frequenz von  $35,2 \cdot 10^3$  Hz beträgt. Bei dieser Frequenz wird die Spannung also ungefiltert durchgelassen.

**Tabelle 1:** Messwerte zur Untersuchung des Selektivverstärkers.

$U_A / \text{V}$	$\nu / 10^3 \text{ Hz}$	$U_A / \text{V}$	$\nu / 10^3 \text{ Hz}$
0,008	25,600	0,385	35,3
0,010	27,200	0,29	35,4
0,014	29,100	0,23	35,5
0,018	30,100	0,18	35,6
0,021	31,100	0,17	35,7
0,024	31,400	0,14	35,8
0,027	31,800	0,12	35,9
0,030	32,100	0,11	36
0,034	32,500	0,1	36,1
0,043	33,000	0,098	36,2
0,048	33,200	0,088	36,3
0,050	33,300	0,084	36,4
0,054	33,400	0,075	36,5
0,057	33,500	0,07	36,6
0,060	33,600	0,065	36,7
0,066	33,700	0,06	36,8
0,072	33,800	0,057	36,9
0,078	33,900	0,054	37
0,081	34	0,053	37,1
0,086	34,100	0,048	37,3
0,096	34,200	0,043	37,5
0,100	34,300	0,039	37,8
0,120	34,400	0,036	38
0,135	34,500	0,033	38,3
0,160	34,600	0,0275	38,9
0,190	34,700	0,025	39,3
0,230	34,800	0,024	39,5
0,300	34,900	0,022	40
0,470	35,200		



**Abbildung 4:** Filterkurve des Selektivverstärkers.

## 4.2 Theoretische Bestimmung der Suszeptibilität

Zunächst wird der theoretische Wert  $\chi_T$  der Suszeptibilität der einzelnen Proben bestimmt. Hierzu werden die Gesamtdrehimpulse  $J$ , die Landé-Faktoren  $g_J$ , sowie die Anzahl  $N$  der magnetischen Momente benötigt.

Die Quantenzahlen - also der Spin  $S$ , der Bahndrehimpuls  $L$  und der Gesamtdrehimpuls  $J$  - können mit den Hundschen Regeln bestimmt werden. Aus diesen wiederum werden über Formel 7 die Landé-Faktoren berechnet. Es ergibt sich für die jeweiligen Proben:

**Tabelle 2:** Werte zur theoretischen Bestimmung der Suszeptibilität.

	$Gd_2O_3$	$Dy_2O_3$	$Nd_2O_3$
S	3,50	2,5	1,5
L	0	5	6
J	3,50	7,5	7,5
$g_J$	2	1,33	0,73

Die Berechnung der Anzahl  $N$  der magnetischen Momente geschieht über folgenden Ansatz, wobei  $m$  die Masse ist,  $\rho$  die Dichte des Stoffes,  $V$  das Volumen,  $n$  die Stoffmenge und  $M$  die molare Masse:

$$\begin{aligned}
 m &= \rho \cdot V = M \cdot n \\
 \Leftrightarrow \frac{n}{V} &= \frac{\rho}{M} \\
 \Leftrightarrow N &= \frac{\rho}{M}
 \end{aligned} \tag{13}$$

Die Dichten werden aus der Versuchseinleitung [1, S. 14] entnommen, die molaren Massen [2] werden mit  $1 \text{ u} = 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  umgerechnet:

**Tabelle 3:** Werte zur theoretischen Bestimmung der Suszeptibilität.

		$Gd_2O_3$	$Dy_2O_3$	$Nd_2O_3$
M/	$10^{-25} \text{ kg}$	6,02	6,19	5,59
N/	$10^{28} \frac{1}{\text{m}^3}$	1,23	1,26	1,29

Nach Einsetzen aller Werte in Formel 9, wobei für die Konstanten

$$\begin{aligned}
 \mu_0 &= 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \\
 \mu_B &= 9,274 \cdot 10^{-24} \frac{\text{J}}{\text{T}} \\
 k &= 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}
 \end{aligned}$$

eingesetzt und für die Temperatur  $T = 294,15 \text{ K}$  angenommen wird, ergeben sich die folgenden theoretischen Werte der Suszeptibilität:

$$\begin{aligned}
\chi_{T,Gd} &= 0,0069 \\
\chi_{T,Dy} &= 0,0126 \\
\chi_{T,Nd} &= 0,0039
\end{aligned} \tag{14}$$

### 4.3 Experimentelle Bestimmung der Suszeptibilität über die Widerstandsdifferenz

Zur Bestimmung der Suszeptibilität der Proben über die Widerstandsdifferenzen wird der Querschnitt der Spule  $F = 8,66 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ , der Querschnitt  $Q$  der Probe, der Widerstand  $R_3 = 998 \Omega$  und die Widerstandsdifferenz  $\Delta R$  benötigt.

Zur Berechnung des Querschnitts  $Q$  werden die Masse  $m$ , die Länge  $l$  und die Dichte  $\rho$  benötigt. Diese sind für die einzelnen Proben gegeben durch:

**Tabelle 4:** Werte zur Berechnung des Querschnitts  $Q$ .

		$Gd_2O_3$	$Dy_2O_3$	$Nd_2O_3$
$m/$	$10^{-3} \text{ kg}$	14,08	15,1	9
$l/$	$10^{-2} \text{ m}$	17,50	17,5	17,4
$\rho/$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	7400	7800	7240

$Q$  kann nun über die Formel

$$Q = \frac{m}{L \cdot \rho}$$

berechnet werden. Die Querschnitte der Proben betragen damit:

$$Q_{Gd} = 10,87 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$Q_{Dy} = 11,06 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$Q_{Nd} = 7,17 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Da für jede der Proben drei Messungen durchzuführen sind, werden die Messwerte der Widerstände zunächst gemittelt und es wird anschließend eine Fehlerrechnung durchgeführt. Allgemein ergibt sich der Mittelwert durch

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i \tag{15}$$

und der Fehler des Mittelwerts durch

$$\Delta \bar{R} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2}. \tag{16}$$

Dies liefert die folgenden Werte:

**Tabelle 5:** Werte zur Bestimmung der Suszeptibilität von  $Gd_2O_3$ .

$R_0/10^{-3} \Omega$	$R_m/10^{-3} \Omega$	$\Delta R/10^{-3} \Omega$	$\bar{R}/10^{-3} \Omega$	$\Delta \bar{R}/10^{-3} \Omega$
3080	2320	760	885	150,7
3300	2115	1185		
2950	2240	710		

**Tabelle 6:** Werte zur Bestimmung der Suszeptibilität von  $Dy_2O_3$ .

$R_0/10^{-3} \Omega$	$R_m/10^{-3} \Omega$	$\Delta R/10^{-3} \Omega$	$\bar{R}/10^{-3} \Omega$	$\Delta \bar{R}/10^{-3} \Omega$
3235	1490	1745	1685	32,15
3040	1405	1635		
3185	1510	1675		

**Tabelle 7:** Werte zur Bestimmung der Suszeptibilität von  $Nd_2O_3$ .

$R_0/10^{-3} \Omega$	$R_m/10^{-3} \Omega$	$\Delta R/10^{-3} \Omega$	$\bar{R}/10^{-3} \Omega$	$\Delta \bar{R}/10^{-3} \Omega$
3060	2755	305	266,7	46,04
3125	2805	320		
3120	2945	175		

Zuletzt werden  $\bar{R}$  und  $\Delta \bar{R}$  der jeweiligen Proben, sowie die Querschnitte  $Q$  und  $F$  in die Formel 12 eingesetzt. Hieraus ergeben sich experimentellen Werte der Suszeptibilität der verschiedenen Materialien:

$$\begin{aligned}
\chi_{R,Gd} &= 0,0014 \pm 0,002 \\
\chi_{R,Dy} &= 0,0269 \pm 0,0005 \\
\chi_{R,Nd} &= 0,0043 \pm 0,0007
\end{aligned} \tag{17}$$

## 5 Diskussion

Die im ersten Versuchsteil bestimmte Filterkurve zeigt den erwarteten markanten Verlauf, was gut die Eigenschaften des Selektivverstärkers deutlich macht. Der zweite Versuchsteil zur Bestimmung der Suszeptibilitäten liefert die folgenden Ergebnisse:

**Tabelle 8:** Ergebnisse der Auswertung.

	$Gd_2O_3$	$Dy_2O_3$	$Nd_2O_3$
$\chi_T$	0,0069	0,0126	0,0039
$\chi_R$	$0,0014 \pm 0,0020$	$0,0269 \pm 0,0005$	$0,0043 \pm 0,0007$

Bei  $Gd_2O_3$  weicht der experimentell bestimmte Wert um 79,71% vom Theoriewert ab, bei  $Dy_2O_3$  beträgt die Abweichung  $-113,49\%$  und bei  $Nd_2O_3$  ist sie  $-10,26\%$ . Diese großen Abweichungen sprechen für keine genaue Messung, was beispielsweise daran liegen könnte, dass die Messwerte nicht genau genug abgelesen werden können. Eine Schwierigkeit ist zudem das Einstellen der Spannung auf ein Minimum über den regelbaren Widerstand, da dieses Minimum oft nicht genau zu erkennen ist und es für einige Widerstände Spannungen gibt, die fehlerhaft sind und somit nicht mit aufgenommen werden können. Dies könnte mit anderen Geräten verbessert werden, die eine genauere Messung ermöglichen. Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung der Suszeptibilität ist die über die Brücken- und Speisespannung, welche hier aufgrund fehlender Messdaten nicht möglich war. Aus diesem Grund kann nicht gesagt werden, ob diese Methode zu besseren Ergebnissen führt oder welche Methode die genauere ist. Es ist allerdings anzunehmen, dass aufgrund des identischen Versuchsaufbaus und -durchführung ähnlich große Fehler aufgetreten wären.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch 606: Messung der Suszeptibilität paramagnetischer Substanzen*. 2018. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/MEDPHYS/BACHELOR/AP/SKRIPT/V606.pdf> (besucht am 10.05.2018).
- [2] WebQC.org. *Rechner für Molare Masse, Molekulargewicht und Elementare Zusammensetzung*. 2018. URL: <https://de.webqc.org/mmcalc.php> (besucht am 14.05.2018).