

V606

## **Messung der Suszeptibilität paramagnetischer Substanzen**

Umut Aydinli  
umut.aydinli@tu-dortmund.de

Muhammed-Sinan Demir  
sinan.demir@tu-dortmund.de

Durchführung: 26.04.2022

Abgabe: 03.05.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Berechnung der Suszeptibilität paramagnetischer Substanzen . . . . .	3
2.2 Messverfahren zur Bestimmung der Suszeptibilität . . . . .	5
2.3 Unterdrückung von Störspannungen bei der Messung kleiner Signalspannungen . . . . .	6
<b>3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung</b>	<b>7</b>
3.1 Bestimmung der Filterkurve des Selektiv-Verstärkers . . . . .	7
3.2 Bestimmung der Suszeptibilität . . . . .	8
<b>4 Auswertung</b>	<b>9</b>
4.1 Untersuchung des Selektiv-Verstärkers . . . . .	9
4.2 Unter der Suszeptibilität seltener Erd-Elemente . . . . .	11
4.3 Theoretische Berechnung der Suszeptibilität . . . . .	12
<b>5 Diskussion</b>	<b>13</b>
<b>6 Anhang</b>	<b>15</b>
<b>Literatur</b>	<b>16</b>

# 1 Zielsetzung

In dem Versuch V606 geht es um die Bestimmung von Suszeptibilität paramagnetischer Substanzen.

## 2 Theorie

### 2.1 Berechnung der Suszeptibilität paramagnetischer Substanzen

Die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  setzt sich aus der magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$ , der Induktionskonstante  $\mu_0$  und der Magnetisierung  $\vec{M}$  im Vakuum zusammen

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}.$$

Durch die Abhängigkeit der Magnetisierung von der magnetischen Feldstärke folgt der Ausdruck

$$\vec{M} = \mu_0 \chi \vec{H}. \quad (1)$$

Der Faktor  $\chi$  ist hierbei die Suszeptibilität, welche Temperatur  $T$  und  $\vec{H}$  anhängig ist. Der Paramagnetismus in diesem Versuch ist nicht in jedem Material zu beobachten, nur bei Stoffen deren Drehimpuls nicht verschwindet. Das liegt an der Orientierung der magnetischen Momente, welche mit dem Drehimpuls gekoppelt sind, die in einem außen anliegendem Feld erzeugt werden. Die Ausrichtung ist jedoch eine thermische Bewegung der Atome, wodurch der Paramagnetismus temperaturabhängig ist und die Orientierung dadurch dauerhaft verändert. Dadurch dass die Magnetischen Momente mit dem Drehimpuls gekoppelt sind wird diese Beziehung näher betrachtet. Der Gesamtdrehimpuls  $\vec{J}$  setzt sich aus der Eigendrehung der Elektronen  $\vec{S}$ , dem Bahnimpuls  $\vec{L}$  und dem Kerndrehimpuls zusammen. Der Kerndrehimpuls wird für den Paramagnetismus jedoch vernachlässigt

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

Dabei sind die Drehimpulse  $\vec{L}$  und  $\vec{J}$  Summen aller Einzeldrehimpulse der Elektronen. Aus der Quantenmechanik folgt:

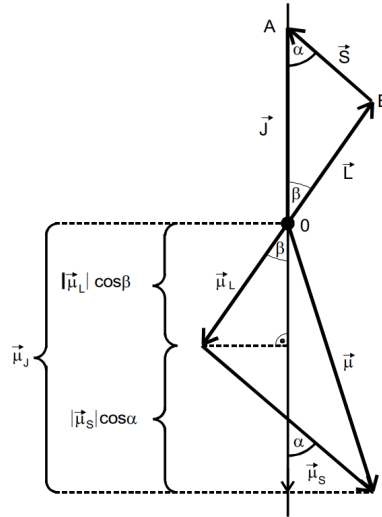
$$\vec{\mu}_L = -\frac{\mu_B}{\hbar} \vec{L} \quad (2)$$

$$\vec{\mu}_S = -g_S \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{S}, \quad (3)$$

mit dem Bohrschen Magneton  $\mu_B$ , und dem gyromagnetischen Verhältnis  $g_S$ . Bei Betrachtung der Beträge hilft die Beziehung  $|\vec{J}| = \sqrt{J(J+1)} \hbar$ , welche für den Gesamtbahndrehimpuls und Gesamtspin analog ist. Daraus folgt:

$$|\mu_L| = \mu_B \sqrt{L(L+1)} \quad (4)$$

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



**Abbildung 1:** Vektordiagramm aus den Drehimpulsvektoren einer Elektronenhülle und den daraus resultierenden magnetischen Momenten [1].

Durch die Abbildung 1 folgt die Beziehung

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

Durch die vereinfachte Annahme, dass  $g_S$  den Wert zwei besitzt, folgt für  $|\vec{\mu}_J|$

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

wobei der Bruchausdruck, der Landé-Faktor ist

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

Die Richtungsquantelung ist ein weiterer Effekt der Quantenphysik, welcher besagt, dass der Winkel zwischen Lage von  $|\vec{\mu}_J|$  und dem außen angelegtem Feld nicht beliebig ist. Für die Z-Komponente ergibt sich

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

wobei  $m$  die Orientierungsquantenzahl ist und der Winkel nur  $2J+1$  verschiedene Einstellungen haben kann. Jede Einstellung hat eine eigene potentielle Energie mit der die Magnetisierung  $\vec{M}$  bestimmt werden kann

$$E = -\vec{\mu}_J \cdot \vec{B} = \mu_{J_z} B = \mu_B g_J m B .$$

Dafür wird die Häufigkeit der auftretenden Winkel berechnet und mit der Formel (8) multipliziert, sowie über alle möglichen Einstellungen summiert, wodurch sich nach Umformungen die Suszeptibilität  $\chi$  ergibt

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

N steht dabei für die Anzahl der Momente pro Volumeneinheit, k für die Boltzmann-Konstante und T für die Temperatur. Wenn die Temperatur hinreichend hoch ist gilt

$$\chi \approx \frac{1}{T},$$

was bekannt als das Curiesche Gesetz des Paramagnetismus ist.

Ionen Seltener Erden haben einen starken Paramagnetismus, welcher zurückzuführen ist auf die Elektronen die in der vierten f-Schale der Elektronenhülle vorhanden sind. Der Drehimpuls, der durch die Anordnung der Elektronen innerhalb der Schale gegeben ist, wird durch die Hundschen Regeln beschrieben.

- Das summieren der Spins  $\vec{s}_i$  führt nach dem Pauli-Prinzip zum maximalen Gesamtspin  $\vec{S} = \sum \vec{s}_i$
- Der Gesamtdrehimpuls ist gegeben durch  $\vec{J} = \vec{L} - \vec{S}$  für eine weniger als halbgefüllte Schale und durch  $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$  für eine mehr als halbgefüllte Schale.
- Der maximale Drehimpuls setzt sich aus der Summierung aller Bahndrehimpulse zusammen, welche unter Beachtung der ersten Regel und dem Pauli-Prinzip gebildet werden können.

## 2.2 Messverfahren zur Bestimmung der Suszeptibilität

Um die Suszeptibilität  $\chi$  experimentell zu bestimmen wird eine Wheatstonsche Brücke, wie in Abbildung 2 gezeigt, verwendet. Wie im Schaltbild zu sehen sind zwei Spulen verbaut, welche möglichst die selbe Induktivität haben sollten. Die Suszeptibilität wird nämlich über die Induktivitätsdifferenz  $\Delta L$  zwischen der materiegefüllten Spule und der Luftspule bestimmt. Eine Methode die zum Bestimmen der Suszeptibilität sieht wie folgt aus. Zuerst wird die Brückenspannung  $U_{Br}$  gemessen und abgeglichen, dadurch verschwindet die Brückenspannung. Als nächstes wird nun eine Spule mit Materie gefüllt und der daraus resultierenden Anstieg der Brückenspannung gemessen, wodurch die Suszeptibilität bestimmt werden kann. Bei Frequenzen die hinreichend hoch sind, also  $\omega^2 L^2 \gg R^2$  gilt, kann durch Vereinfachungen sowie Umformungen die Suszeptibilität bestimmt werden durch

$$\chi(\omega \rightarrow \infty) = 4 \frac{F}{Q} \frac{U_{Br}}{U_{Sp}}. \quad (10)$$

Dabei stehen  $F$  für den Spulenquerschnitt und  $Q$  für den Querschnitt der Probe und  $U_{Sp}$  für die Speisespannung. Die andere Methode besteht aus dem selben Verfahren wie bei der erste Methode, jedoch wird nach dem füllen einer Spule die Brückenspannung erneut abgeglichen und durch die Änderung der Abgleichelemente die Suszeptibilität bestimmt. Berechnen lässt sich diese, durch

$$\chi = 2 \frac{\Delta R}{R_3} \frac{F}{Q}. \quad (11)$$

$\Delta R$  steht dabei für die Differenz der Einstellungen am Potentiometer und  $R_3$  für den ersten abgeglichenen Widerstand.

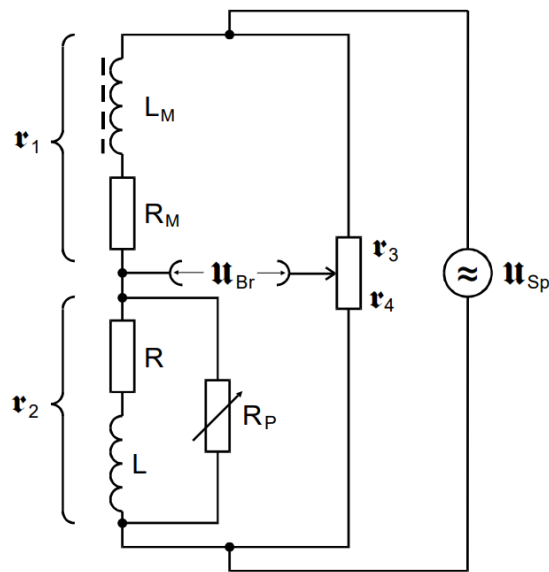


Abbildung 2: Brückenschaltung für die Messung der Suszeptibilität [1].

### 2.3 Unterdrückung von Störspannungen bei der Messung kleiner Signalspannungen

Bei Brückenschaltungen sind immer Störspannungen an den Ausgängen vorhanden. Durch diese wird die Brückenspannung komplett überdeckt und die Messung der Suszeptibilität nicht möglich. Dies wird durch einen Selektivverstärker jedoch möglich, da bei dieser Messung monofrequente Signalspannung vorliegen und durch ein elektronischen Filter, wie der Selektivverstärker, nur bestimmte Spannungen mit bestimmten Frequenzen durchgelassen werden. Die Filterkurve von dem Selektivverstärker steht im Verhältnis von Ausgangsspannung  $U_A$  zur Eingangsspannung  $U_E$ , ist abhängig von der Frequenz und wird in Abbildung 3 verbildlicht.

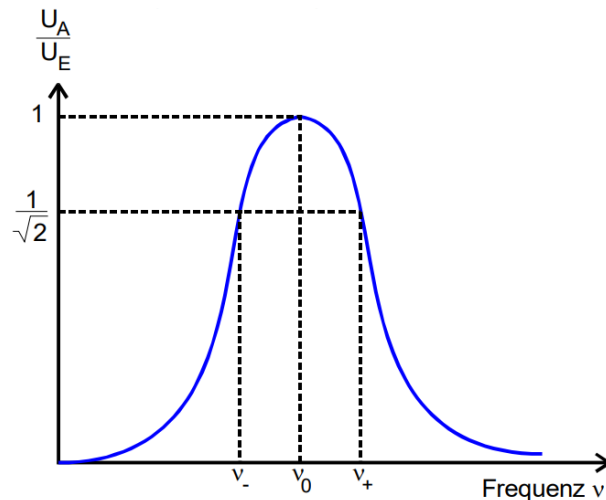


Abb.3: Filterkurve eines Selektivverstärkers

Abbildung 3: Glockenkurve des Selektivverstärkers [1].

Die Breite dieser Kurve steht als Maß für die Wirksamkeit der Störspannungsunterdrückung, welcher im engen Zusammenhang mit der Güte  $Q$  steht

$$Q = \frac{\nu_0}{\nu_+ - \nu_-}. \quad (12)$$

Die Differenz der beiden Frequenzen wird bei dem Verhältnis  $\frac{U_A}{U_E}$  an der Stelle  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  bestimmt.

### 3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

#### 3.1 Bestimmung der Filterkurve des Selektiv-Verstärkers

Der Aufbau aus diesem Versuchsteil besteht aus einem Frequenzgenerator, einem Selektivverstärker, einem Voltmeter und zwei Kabeln. Das Voltmeter kann optional auch

mit einem Oszilloskop gewechselt werden. Der Generator wird mit Selektivverstärker über ein Kabel verbunden und der Selektivverstärker mit dem Voltmeter an dem die Spannung angezeigt wird. Zusehen ist der Aufbau in Abbildung 4. Es werden etwa 40 verschiedenen Frequenzen eingestellt die in dem Intervall von 10 kHz bis 35 kHz auswählbar sind. Die Güte wird an dem Selektivverstärker auf 20 eingestellt und die Verstärkung auf 10fach gestellt.

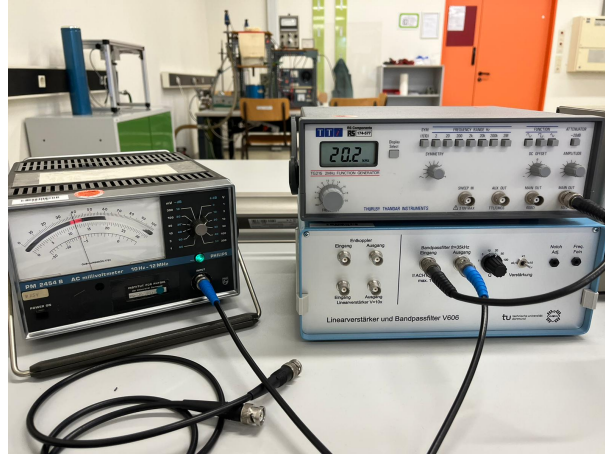


Abbildung 4: Der Aufbau der ersten Aufgabe.

### 3.2 Bestimmung der Suszeptibilität

Der Aufbau aus diesem Versuchsteil besteht aus einem Sinus-Generator, der Brückenschaltung, einem Selektivverstärker, einem Voltmeter, drei verschiedenen Proben und Kabeln. Der Sinusgenerator wird mit dem Eingang für die Speisespannung verbunden, der Eingang der Brückenspannung wird mit dem Selektivverstärker verbunden und der Selektivverstärker mit dem Voltmeter. Zuerst wird die Brückenspannung auf null bzw. minimal gesetzt durch das variieren des Potentiometers und die Frequenz davon, sowie die Ziffer des Potentiometers aufgenommen. Danach wird in eine Spule eine Probe gegeben, die daraus entstehende Frequenz aufgenommen und die Brücke wieder abgeglichen. Die Ziffer die das Potentiometer anzeigt nach dem messen wird ebenfalls notiert. Durchgeführt wird dies für alle drei Proben jeweils drei mal.





Abbildung 5: Abbildung der verwendeten Brückenschaltung.

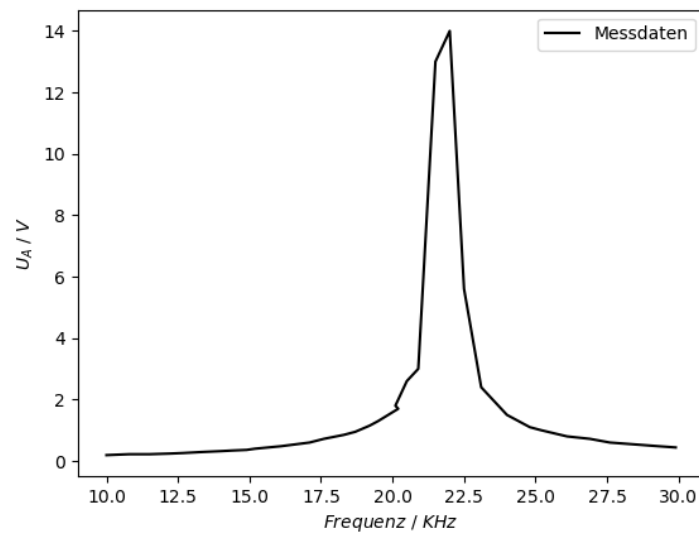
## 4 Auswertung

### 4.1 Untersuchung des Selektiv-Verstärkers

Untersucht wird die Ausgangsspannung  $U_A$  des Selektivverstärkers bei konstanter Eingangsspannung  $U_E$  in Abhängigkeit von der Frequenz. Durchgenommen wird die Aufgabe mit einer Güte von  $Q = 20$ , sowie mit Durchlassfrequenzen zwischen 10 kHz bis 30 kHz. Die Frequenzen  $\nu$  mit den jeweiligen Ausgangsspannungen werden in Tabelle 1 festgehalten. Aus der daraus resultierenden Durchlasskurve, Abbildung 6, wird die Güte nach der Formel (12) dazu wie in Abbildung 3 berechnet.

**Tabelle 1:** Messwerte zur Untersuchung des Selektiv-Verstärkers.

f / kHz	U / V	f / kHz	U / V
10,0	0,19	20,2	1,70
10,8	0,22	20,1	1,80
11,5	0,22	20,5	2,60
12,2	0,24	20,9	3,00
12,7	0,26	21,5	13,0
13,3	0,29	22,0	14,0
14,0	0,32	22,5	5,60
14,4	0,34	23,1	2,40
14,9	0,36	23,5	2,00
15,2	0,40	24,0	1,50
16,1	0,48	24,8	1,10
17,1	0,60	25,2	1,00
17,6	0,72	26,1	0,80
18,3	0,85	26,9	0,72
18,7	0,95	27,6	0,60
19,2	1,15	29,3	0,48
19,5	1,30	29,9	0,44



**Abbildung 6:** Durchlasskurve des Selektiv-Verstärkers

Daraus folgt für die Güte

$$Q = (27,5 \pm 0,5) .$$

## 4.2 Unter der Suszeptibilität seltener Erd-Elemente

Für den Aufgabenteil wird eine Spule mit der Länge  $l = 0,135 \text{ m}$ , Widerstand  $R = 0,7 \Omega$ , Windungszahl  $n = 250$  und einer Querschnittsfläche von  $F = 86,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$  verwendet. Da die Proben aus staubförmigen Material bestehen und sich nicht beliebig stopfen lassen ist ihre Dichte geringer. Aus diesem Grund wird die Querschnittsfläche nach der Formel

$$Q_{\text{real}} = \frac{m_p}{L \cdot \delta_w} , \quad (13)$$

für jede einzelne Probe korrigiert. Benutzt werden drei Ionen mit den jeweiligen Daten in der Tabelle 2.

**Tabelle 2:** Daten zu dem Ionen.

Ionen	$m_p / \text{kg}$	$L / 10^{-2} \text{ m}$	$\delta_w / \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$Q_{\text{real}} / 10^{-6} \text{ m}^2$
$\text{Dy}_2\text{O}_3$	0,0151	$15,40 \pm 0,10$	7800	12,57
$\text{Gd}_2\text{O}_3$	0,0141	$15,73 \pm 0,15$	7400	12,11
$\text{Nd}_2\text{O}_3$	0,0185	$15,56 \pm 0,21$	7240	16,42

Gemessen wird die Brückenspannung sowie der Widerstand nachdem Abgleich ohne Probe. Die Probe wird eingeführt, die Brückenspannung wird abgelesen und nachdem Abgleich wird der Widerstand abgelesen. Der Vorgang wiederholt sich für alle drei Ionen und wird in Tabelle 3 festgehalten. Aus der Widerstandsänderung  $\Delta R$ , der Formel (10) und (11) resultiert die Größe der Suszeptibilität, notiert in Tabelle 5. Der Betrag der Speisespannung beträgt  $|U_{\text{sp}}| = 1 \text{ V}$  und  $R_3$  beträgt  $1000 \Omega$ .

**Tabelle 3:** Messergebnisse der Ionen.

Ionen	$U_{oP} / 10^{-3} \text{ V}$	$R_{oP} / 10^{-3} \Omega$	$U_{mP} / 10^{-3} \text{ V}$	$R_{mP} / 10^{-3} \Omega$	$\Delta U / 10^{-3} \text{ V}$	$\Delta R / 10^{-3} \Omega$
<u>Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u>	13,0	2525	17,5	990	4,5	1535
	12,5	2370	15,5	1050	3,0	1320
	12,0	2770	18,5	975	6,5	1790
<u>Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u>	11,5	2575	13,5	1825	2,0	750
	12,5	2650	13,5	2070	1,0	580
	12,5	2645	13,0	1850	0,5	795
<u>Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u>	11,5	2650	12,5	2385	1,0	265
	12,5	2715	12,0	2420	-0,5	295
	12,0	2610	12,0	2385	0	225

Die Werte werden in Tabelle 4 und 5 gemittelt und die Standardabweichung gebildet.

**Tabelle 4:** Mittelwerte und Abweichungen der Spannungen.

Ionen	$U_{oP} / 10^{-3} \text{ V}$	$U_{mP} / 10^{-3} \text{ V}$	$\Delta U / 10^{-3} \text{ V}$
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$12,50 \pm 0,40$	$17,16 \pm 0,24$	$4,60 \pm 1,43$
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$12,16 \pm 0,47$	$13,30 \pm 0,23$	$1,16 \pm 0,62$
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$12,00 \pm 0,40$	$12,16 \pm 0,23$	$0,16 \pm 0,62$

**Tabelle 5:** Mittelwerte und Abweichungen der Widerstände.

Ionen	$R_{oP} / 10^{-3} \Omega$	$R_{mP} / 10^{-3} \Omega$	$\Delta R / 10^{-3} \Omega$
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$2555 \pm 166,74$	$1005 \pm 32,40$	$1550 \pm 194,2$
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$2623 \pm 34,23$	$1915 \pm 110,07$	$708,3 \pm 92,58$
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$2658 \pm 43,26$	$2396,6 \pm 272,37$	$261,6 \pm 28,67$

**Tabelle 6:** Suszeptibilität der seltenen Erd-Elemente.

Ionen	$\chi_U$	$\chi_R$
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$0,012900 \pm 0,0030590$	$0,02135 \pm 0,003180$
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$0,004770 \pm 0,0032715$	$0,01013 \pm 0,001571$
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$0,000352 \pm 0,0018523$	$0,00250 \pm 0,000347$

### 4.3 Theoretische Berechnung der Suszeptibilität

Die Suszeptibilität berechnet sich theoretisch nach der Formel (9). Aus den Hund'schen Regeln ergeben sich dann die Werte für Spin, Drehimpuls, Gesamtdrehimpuls und der daraus resultierende Landé-Faktor, welcher sich nach Formel (7) berechnen lässt. Dabei enthält  $\text{Nd}^{3+}$  drei,  $\text{Gd}^{2+}$  sieben und die  $\text{Dy}^{3+}$  -Hülle neun 4f-Elektronen. Die Daten werden in Tabelle 7 aufgenommen. Als Temperatur wird der Wert  $T = 293 \text{ K}$  verwendet.  $N$  ist die Anzahl der Momente pro Volumeneinheit und berechnet sich nach

$$N = \frac{\delta_w}{M}.$$

$M$  ist dabei die Molare Masse. Daraus folgt

$$\begin{aligned} N_{\text{Dy}_2\text{O}_3} &= 2,52 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{m}^3} \\ N_{\text{Gd}_2\text{O}_3} &= 2,46 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{m}^3} \\ N_{\text{Nd}_2\text{O}_3} &= 2,59 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{m}^3}. \end{aligned}$$

**Tabelle 7:** Quanteneigenschaften.

	$\text{Dy}_2\text{O}_3$	$\text{Gd}_2\text{O}_3$	$\text{Nd}_2\text{O}_3$
4f-Elektron	9,0	7,0	3,0
Spin $S$	2,5	5,0	3,5
Drehimpuls $L$	5,0	0	6,0
Gesamtdrehimpuls $J$	7,5	3,5	4,5
Landé-Faktor $g_i$	1,33	2,0	0,73

Aus den Quanteneigenschaften folgt für die theoretische Werte der Suszeptibilität:

$$\begin{aligned} \chi_{T,\text{Dy}_2\text{O}_3} &= 0,0254 \\ \chi_{T,\text{Gd}_2\text{O}_3} &= 0,0138 \\ \chi_{T,\text{Nd}_2\text{O}_3} &= 0,0030. \end{aligned}$$

## 5 Diskussion

Im ersten Teil der Versuchsreihe wurde eine Durchlasskurve erstellt, mit der daraus resultierenden Güte. In der Aufgabenstellung war eine Güte von  $Q = 100$  angegeben. Jedoch fiel die Messung mit einer Güte von  $Q = 100$  schwer, da die Messapparatur die Ergebnisse nicht klar anzeigte. Aus diesem Anlass wurde eine Güte  $Q = 20$  angenommen. Es war zu erwarten, dass der Bandpassfilter ein Maximum bei  $f = 35 \text{ kHz}$  anzeigen würde, jedoch stellte sich fest, dass sich das Maximum bei  $f = 22 \text{ kHz}$  befand. Die resultierende Abweichung lautet

$$Q_{\text{exp}} = (27,5 \pm 0,5) \quad Q_{\text{exp}} = 20 \\ \rightarrow 25\%.$$

Die Messung enthält viele Ungenauigkeiten. Das Einstellen der Durchlassfrequenz schwankte schlagartig, wodurch klare Messpaare schwer zustande kamen. Zeitlich wurde das Messgerät auf ein Oszilloskopen gewechselt, womit die Messung einfacher wurde. Dennoch schwankte der Graph durch die ständige Änderung der Frequenz. Somit entstanden mögliche Ablesefehler.

Der zweite Teil des Versuches erfolgte brüchig. Der Sinusgenerator stürzte bei jeder Messung ab, wodurch sich der Zeiger ständig änderte und das Ablesen dadurch schwerer wurde. Die ersten Proben erfolgten trotzdem positiv, jedoch änderte sich die Messung bei der Probe  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  nicht. Dessen ungeachtet folgten ausreichende Messergebnisse. Auffällig sind hierbei die Abweichungen:

**Tabelle 8:** Suszeptibilität der seltenen Erd-Elemente.

Ionen	$\chi_U$ mit $\chi_T$ in %	$\chi_R$ mit $\chi_T$ in %
$\text{Dy}_2\text{O}_3$	49,50	15,90
$\text{Gd}_2\text{O}_3$	65,40	26,59
$\text{Nd}_2\text{O}_3$	88,26	16,00

Wie zu erwarten ist die Abweichung von  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  sehr hoch. Die Messung mit der Probe erfolgte so gut wie gar nicht. Der Zeiger der Messapparatur bewegte sich kaum, weder vor dem Abgleich oder danach. Nichtsdestotrotz sind die Ergebnisse der anderen Proben, trotz der vielen Fehlerarten akzeptabel. Die Messung der Suszeptibilität durch die Widerstandsänderung  $\Delta R$  erwies sich profitabler als die Messung über die Brückenspannung.

Es ist anzumerken, dass die Apparatur einen 10-mal Verstärker hatte, allerdings hat die Verstärkung keinen großen Effekt auf die Messung, da sich nur die Größenordnung verändert. Sie diente für das bessere Ablesenden der Werte.

## 6 Anhang

V606

Bandpassfilter  $f = 35 \text{ kHz}$   
am Ende durch 10

$T_1$	kHz	V
20.2	1.2	10.1
20.6	1.7	8.5
21.3	3.6	<del>10</del>
21.5	3.5	10.1
22.1		

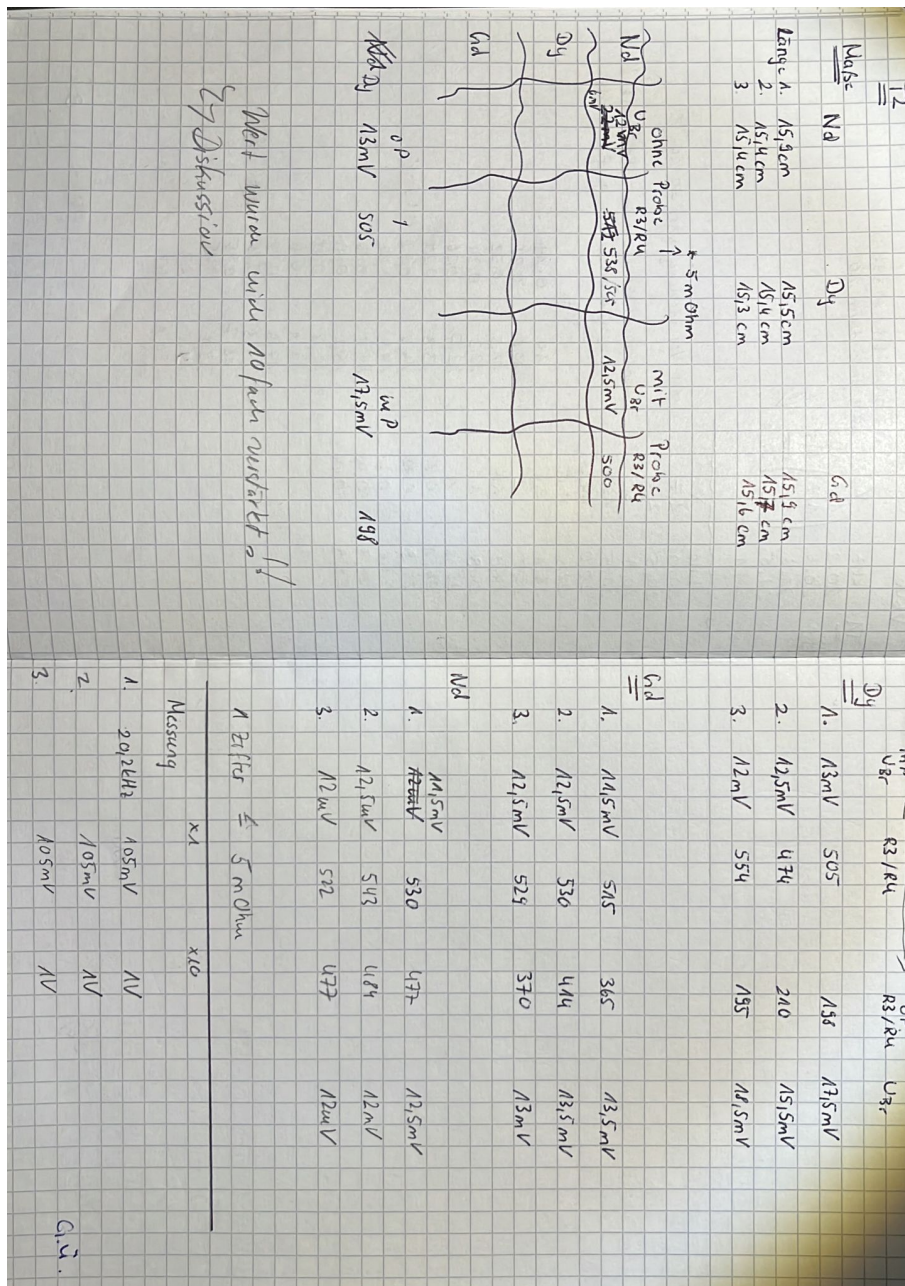
mit Verstärkung  $\times 10 \Rightarrow 10^{-4}$

Bandpassfilter nicht bei  $f = 35 \text{ kHz}$ !  
Wahrscheinlich bei  $f = 23 \text{ kHz}$

kHz	V
20.0	1.7
20.5	2.6
20.9	3.0
21.5	13.0
22.0	14.0
22.5	5.6
23.1	2.4
23.5	2
24.0	1.5
24.8	1.1
25.2	1
26.1	0.8
26.8	0.72
27.6	0.6
28.3	0.48
28.9	0.44

10	0.19
10.8	0.22
11.5	0.22
12.2	0.24
12.7	0.26
13.3	0.29
14.0	0.32
14.4	0.34
14.9	0.36
15.2	0.40
16.1	0.48
17.1	0.6
17.6	0.72
18.3	0.85
18.7	0.95
19.2	1.15
19.5	1.3
20.1	1.8

G.u.



## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Messung der Suszeptibilität paramagnetischer Substanzen*. 2022. URL: [https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1931001/mod\\_resource/content/1/V606.pdf](https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1931001/mod_resource/content/1/V606.pdf) (besucht am 26.04.2022).