

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DORTMUND

PHYSIKALISCHES PRAKTIKUM

**V606 - Suszeptibilität paramagnetischer  
Substanzen**

Elçin Akay, [elcin.akay@tu-dortmund.de](mailto:elcin.akay@tu-dortmund.de)

Robin Hegering, [robin.hegering@tu-dortmund.de](mailto:robin.hegering@tu-dortmund.de)

DURCHFÜHRUNG AM 23. APRIL 2019  
ABGABE AM 30. APRIL 2019

# 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 Suszeptibilität seltener Erden . . . . .	5
2.3 Induktivität einer hinreichend langen Zylinderspule . . . . .	5
2.4 Bestimmung der magnetischen Suszeptibilität mithilfe einer Brückenschaltung . . . . .	6
<b>3 Durchführung</b>	<b>7</b>
3.1 Untersuchung der Filterkurve des Selektivverstärkers . . . . .	7
3.2 Untersuchung der Suszeptibilität verschiedener paramagnetischer Stoffe .	7
<b>4 Auswertung</b>	<b>8</b>
4.1 Die Durchlasskurve des Selektivverstärkers . . . . .	8
4.2 Bestimmung der Suszeptibilität . . . . .	10
4.2.1 Bestimmung der Suszeptibilität über Widerstandswerte . . . . .	11
4.2.2 Bestimmung der Suszeptibilität über die Brückenspannung . . . . .	12
<b>5 Diskussion</b>	<b>12</b>
<b>Literatur</b>	<b>13</b>

# 1 Zielsetzung

Motivation dieses Versuches ist, die Magnetisierbarkeit von paramagnetischen Substanzen in einem externen Magnetfeld zu berechnen.

## 2 Theorie

### 2.1 Berechnung der Suszeptibilität paramagnetischer Substanzen

Die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  wird mit Hilfe von der magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$  und der Induktionskonstanten  $\mu_0$  in der Materie beschrieben als

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

Hierbei ist  $\vec{M}$  die Magnetisierung und kann durch die Gleichung

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

errechnet werden. Das  $\chi$  ist hierbei die magnetische Suszeptibilität, und beschreibt eine Proportionalität von Änderung der Magnetisierung zur Änderung der magnetischen Feldstärke. Um nun zwischen Materialien unterscheiden zu können, wird der Gesamtdrehimpuls  $\vec{J}$  betrachtet. Dieser entsteht durch die Ausrichtung der magnetischen Momente in einem externen Magnetfeld. Bleibt nun dieser Gesamtdrehimpuls  $\vec{J}$  erhalten, so spricht man von Paramagnetismus. Das der Paramagnetismus temperaturabhängig sein muss, zeigt, dass die Ausrichtung der magnetischen Momente der Atome durch thermische Bewegungen gestört werden.

Der Gesamtdrehimpuls  $\vec{J}$  ist die Summe aus dem Gesamtbahndrehimpuls  $\vec{L}$  und dem Gesamtspin  $\vec{S}$ . So lässt sich zu  $\vec{S}$  und  $\vec{L}$  ein magnetisches Moment bestimmen

$$\begin{aligned} \vec{\mu}_{\vec{L}} &= -\frac{\mu_B}{\hbar} \cdot \vec{L} \\ \vec{\mu}_{\vec{S}} &= -g_S \frac{\mu_B}{\hbar} \cdot \vec{S} \end{aligned}$$

wobei  $\hbar$  das Planck'sche Wirkungsquantum [2] darstellt. Um nun das Bohr'sche Magneton  $\mu_b$  zu berechnen, gilt die Beziehung

$$\mu_b = \frac{e_0 \hbar}{2 m_0}.$$

Für die Beträge der magnetischen Momente kann analog der Betrag der Drehimpulse  $|\vec{J}| = \sqrt{J(J+1)} \hbar$  berechnet werden, zu

$$\begin{aligned} |\vec{\mu}_{\vec{L}}| &= \mu_B \sqrt{L(L+1)} \\ |\vec{\mu}_{\vec{S}}| &= g_S \mu_B \sqrt{S(S+1)} \end{aligned}$$

Nun kann zum Gesamtdrehimpuls  $\vec{J}$  das dazugehörige magnetische Moment  $\mu_J$  bestimmen. Dazu wird die Relation aus Abbildung 1 genutzt, und ergibt für den Betrag des magnetischen Momentes

$$|\vec{\mu}_J| = |\vec{\mu}_S| \cdot \cos \alpha + |\vec{\mu}_L| \cdot \cos \beta. \quad (2)$$

Für die Teilchen mit einem halbzahligen Spin ist  $g_S$  von 2 gilt somit für die Gleichung (2)

$$|\vec{\mu}_J| = \mu_B \sqrt{J(J+1)} \frac{3J(J+1) + [S(S+1) - L(L+1)]}{2J(J+1)}.$$

Der Bruch wird auch als Landé Faktor  $g_J$  bezeichnet, und vereinfacht die Gleichung zu

$$|\vec{\mu}_J| = \mu_B \sqrt{J(J+1)} g_J. \quad (3)$$

Die Orientierungsquantenzahl  $m$  wird benötigt, da aufgrund der Richtungsquantelung nur bestimmte Winkel möglich sind. In diesen müssen  $\vec{\mu}_J$  und die z-Komponente  $\mu_{J_z}$  ein ganzzahliges Vielfaches von  $\mu_B g_J$  sein.

$$\mu_{J_z} = -\mu_B g_J m$$

Für die Orientierungsquantenzahl  $m$  gilt  $-J \leq m \leq J$ , somit existieren genau  $2J+1$  Orientierungen des magnetischen Momentes zur gegebenen Feldrichtung. Somit ergibt sich eine potentielle Energie von

$$E_m = \mu_B g_J m B.$$

Durch diese Energie kann die Magnetisierung einer Probe berechnet wird. Dazu wird die Auftrittshäufigkeit der Orientierungen der magnetischen Momente bestimmt, und mit dem jeweiligen Betrag des Momentes multipliziert. Das Ergebnis wird dann anschließend über alle anderen Orientierungen summiert. Festgelegt wird die Besetzungshäufigkeit eines Energieniveaus durch die Boltzmann-Verteilung zu

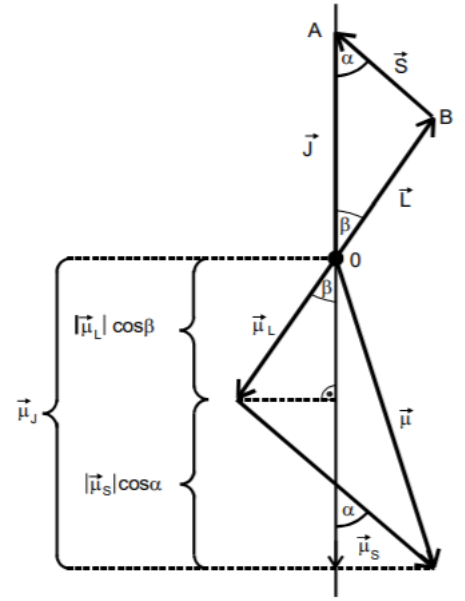
$$Z(E, T) = e^{\frac{-E}{kT}} \quad (4)$$

Das magnetische Moment wird durch die Summation über alle Niveaus ausgedrückt über

$$\mu_{\text{ges}} = -\mu_B g_J \sum_{m=-J}^J m e^{\frac{-\mu_B g_J m B}{kT}}$$

Wird nun durch die Gesamthäufigkeit aller Orientierungen geteilt, so ergibt sich für das mittlere magnetische Moment

$$\bar{\mu} = -\mu_B g_J \frac{\sum_{m=-J}^J m e^{\frac{-\mu_B g_J m B}{kT}}}{\sum_{m=-J}^J e^{\frac{-\mu_B g_J m B}{kT}}}$$



**Abbildung 1:** Vektordiagramm der Drehimpulsvektoren und der magnetischen Momente [1].

Nun kann die Magnetisierung  $M$  berechnet werden als

$$M = \mu_0 N \bar{\mu}. \quad (5)$$

Bei Raumtemperatur und Feldern bis einem Tesla kann diese Formel genähert werden zu

$$\chi = \frac{\mu_0 \mu_B^2 g_J^2 N J(J+1)}{3kT}, \quad (6)$$

wobei  $N$  die Anzahl der Momente pro Volumeneinheit,  $T$  die Temperatur und  $k$  die Boltzmannkonstante beschreibt.

## 2.2 Suszeptibilität seltener Erden

Starker Paramagnetismus kann bei seltenen Erden beobachtet werden. Dies erfolgt aufgrund einem hohen Drehimpuls der Elektronenhülle. Da auch Ionen einen starken Paramagnetismus aufweisen, muss der Drehimpuls durch die inneren Elektronen erzeugt werden. Hierbei handelt es sich um Elektronen der 4f-Schale. Die Anordnung der Elektronen ist auf die *Hundschen Regeln* zurück zu führen

1. Der Gesamtdrehimpuls  $\vec{S}$  ergibt sich aus den einzelnen Spins  $\vec{s}$  der Elektronen mit  $\vec{S} = \sum_j \vec{s}_j$ .
2. Sind nach dem Pauli-Prinzip mehrere Zustände mit  $\vec{S}$  möglich, werden Unterzustände mit  $m_1$  so besetzt, dass der Gesamtbahndrehimpuls  $\vec{L}$  maximal wird. Es gilt  $\vec{L} = \sum_j \vec{l}_j$ .
3. Ist die Elektronenschale mehr als halb gefüllt, folgt für den Gesamtdrehimpuls  $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$ . Für weniger als halb gefüllte Schalen gilt  $\vec{J} = \vec{L} - \vec{S}$ .

## 2.3 Induktivität einer hinreichend langen Zylinderspule

Wie in Kapitel 3 beschrieben wird, ist es möglich, die Suszeptibilität eines paramagnetischen Stoffes durch die Änderung der Induktivität einer Spule zu bestimmen. Die Induktivität  $L$  einer langen Spule im Vakuum wird durch

$$L = \mu_0 \frac{n^2}{l} F$$

beschrieben, wobei  $n$  die Windungszahl,  $l$  die Länge und  $F$  den Querschnitt der Spule darstellen und  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{N/A}^2$  die magnetische Feldkonstante. Wird die Spule allerdings mit Materie ausgefüllt, ändert sich die Induktivität zu

$$L_{M_{\text{total}}} = \mu \mu_0 \frac{n^2}{l} F. \quad (7)$$

$\mu$  stellt dabei die magnetische Permeabilität dar und ist eine Materialkonstante. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass es aufgrund des Versuchsaufbaus nicht möglich ist, die

Spule vollständig mit dem zu untersuchenden Stoff auszufüllen. Daher ändern sich der effektive Spulenquerschnitt und damit die Induktivität zu

$$\begin{aligned} L_M &= \mu_0 \frac{n^2 F}{l} + (\mu - 1) \mu_0 \frac{n^2 Q}{l} \\ &= \mu_0 \frac{n^2 F}{l} + \chi \mu_0 \frac{n^2 Q}{l} \end{aligned} \quad (8)$$

$Q$  stellt hierbei den Probenquerschnitt dar. Damit ist mit  $\chi = \mu - 1$  ein Zusammenhang zwischen Induktivität einer langen Spule und der magnetischen Suszeptibilität der darin enthaltenen Materie hergestellt. Dieser ergibt sich zu

$$\Delta L = \mu_0 \chi Q \frac{n^2}{l}. \quad (9)$$

Praktisch wird dies realisiert, indem zwei möglichst gleiche Spulen in eine Seite einer Brückenschaltung integriert werden. Ändert sich im Folgenden die Induktivität einer der beiden baugleichen Spulen durch eine Änderung der ausfüllenden Materie, lässt sich anhand dieser Änderung die magnetische Suszeptibilität des Füllmaterials berechnen.

## 2.4 Bestimmung der magnetischen Suszeptibilität mithilfe einer Brückenschaltung

Für die Brückenspannung  $U_{Br}$  lässt sich die Gleichung

$$U_{Br} = \frac{R_4 R_1 - R_3 R_2}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_{Sp}$$

aufstellen, wobei die Bezeichnungen der Widerstände denen in Abbildung 2 entsprechen und  $U_{Sp}$  die Speisespannung ist. Werden nun die (teilweise komplexen) Widerstände eingesetzt, ergibt sich mit der Näherung  $R_3 \approx R_4$

$$\begin{aligned} U_{Br} &= \frac{1}{2} \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} U_{Sp} \\ &= \frac{1}{2} \frac{i\omega(L_M - L)}{2R + i\omega(L_M + L)} U_{Sp} \end{aligned}$$

und für den Betrag ergibt sich mit Gleichung (8) und (9)

$$U_{Br} = \frac{\omega \mu_0 \chi n^2 Q}{4l} \sqrt{R^2 + \omega^2 \left( \mu_0 \frac{n^2}{l} F \right)^2}^{-1} U_{Sp}.$$

Für ausreichend hohe Messfrequenzen folgt für die magnetische Suszeptibilität

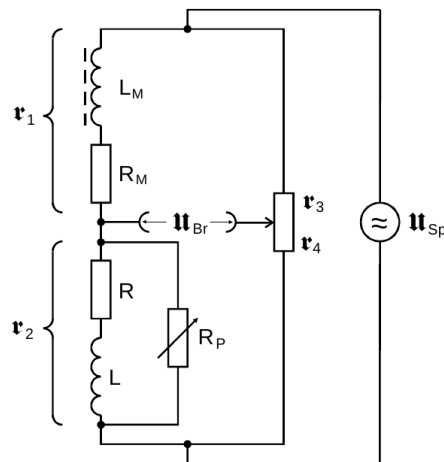
$$\chi(\omega \rightarrow \infty) = 4 \frac{F U_{Br}}{Q U_{Sp}}. \quad (10)$$

Analog folgt für die Abgleichbedingung über die Widerstände berechnet

$$\chi = 2 \frac{\Delta R}{R_{3,4}} \frac{F}{Q}. \quad (11)$$

### 3 Durchführung

Um die Suszeptibilität paramagnetischer Stoffe bestimmen zu können, werden eine Brückenschaltung und ein Sinusgenerator für das Eingangssignal benötigt. Die in diesem Versuch verwendete Brückenschaltung ist in Abbildung 2 dargestellt. Interessant ist dabei jeweils die Brückenspannung, die bei  $U_{Br}$  abgegriffen wird. Da die zu untersuchenden Ströme sehr klein sind und daher Störeinflüsse zu berücksichtigen sind, wird außerdem ein Selektivverstärker benötigt. Dieser ist in der Lage, einen Großteil der Störfrequenzen, die ein breites Spektrum abdecken, herauszufiltern und nur Frequenzen im Bereich der Sinusfrequenz der Eingangsspannung passieren zu lassen. Charakteristisch für einen Selektivverstärker sind dabei die Güte und die Filterkurve.



**Abbildung 2:** Brückenschaltung zur Bestimmung der Suszeptibilität paramagnetischer Stoffe.

#### 3.1 Untersuchung der Filterkurve des Selektivverstärkers

Zur Untersuchung der Filterkurve des Selektivverstärkers wird eine Sinusspannung direkt auf den Eingang des Selektivverstärkers gegeben. Dann wird die Frequenz einer Sinusspannung mit  $U_{\text{sinus}} = 0,1 \text{ V}$  im Bereich von  $30 \text{ kHz} \leq f_{\text{sinus}} \leq 40 \text{ kHz}$  variiert und die entsprechende Ausgangsspannung des Selektivverstärkers gemessen.

#### 3.2 Untersuchung der Suszeptibilität verschiedener paramagnetischer Stoffe

Zur Bestimmung der Suszeptibilität muss die Brückenschaltung zunächst abgeglichen werden. Dazu wird der regelbare Widerstand  $R_P$  so eingestellt, dass die Brückenspannung  $U_{Br}$  auf  $0 \text{ V}$  absinkt. Da die fließenden Ströme allerdings sehr klein sind, müssen auftretende Störeffekte berücksichtigt werden. Aus diesem Grund sinkt die Brückenspannung nicht auf null ab, sondern wird nur mit dem regelbaren Widerstand auf einen Minimalwert eingepegelt. Der eingestellte Widerstand sowie die entsprechende Brückenspannung

werden notiert. Anschließend wird eine Probe des zu untersuchenden Stoffes vorsichtig in die Spule  $L_M$  (siehe Abbildung 2) eingeführt. Dann wird die sich einstellende Brückenspannung ebenfalls notiert. Um die Suszeptibilität auf zwei Wegen bestimmen zu können, wird die Brückenspannung nun mithilfe des regelbaren Widerstands erneut auf ihren Minimalwert eingepegelt. Das Verfahren wird für insgesamt drei Proben je dreimal durchgeführt.

## 4 Auswertung

### 4.1 Die Durchlasskurve des Selektivverstärkers

Die zur Auswertung genutzten Messwerte sind in der Tabelle 1 dargestellt, und werden benötigt um die Durchlasskurve graphisch darzustellen.

**Tabelle 1:** Aufgenommene Messwerte der Durchlasskurve des Selektivverstärkers.

Frequenz $v$ / kHz	Ausgangsspannung $U_A$ / V	Frequenz $v$ / kHz	Ausgangsspannung $U_A$ / V
30,0	0,046	35,2	2,023
30,5	0,054	35,5	1,116
31,0	0,063	36,0	0,451
31,5	0,077	36,5	0,249
32,0	0,095	37,0	0,209
32,5	0,115	37,5	0,179
33,0	0,155	38,0	0,126
33,5	0,200	38,5	0,105
34,0	0,260	39,0	0,098
34,5	0,445	39,5	0,092
35,0	1,049	40,0	0,081

Auf der Y-Achse der Abbildung 4 wird die konstante Eingangsspannung  $U_E = 100\text{mV}$  durch die jeweils gemessene Ausgangsspannung  $U_A$  dividiert und anschließend gegen die Frequenz  $v$  aufgetragen.

Um die Frequenzen besser ablesen zu können, wurde in Abbildung 3 der Peak vergrößert. Die restlichen Messwerte können aus einem logischen Verlauf, oder durch die Abbildung 4 erschlossen werden.

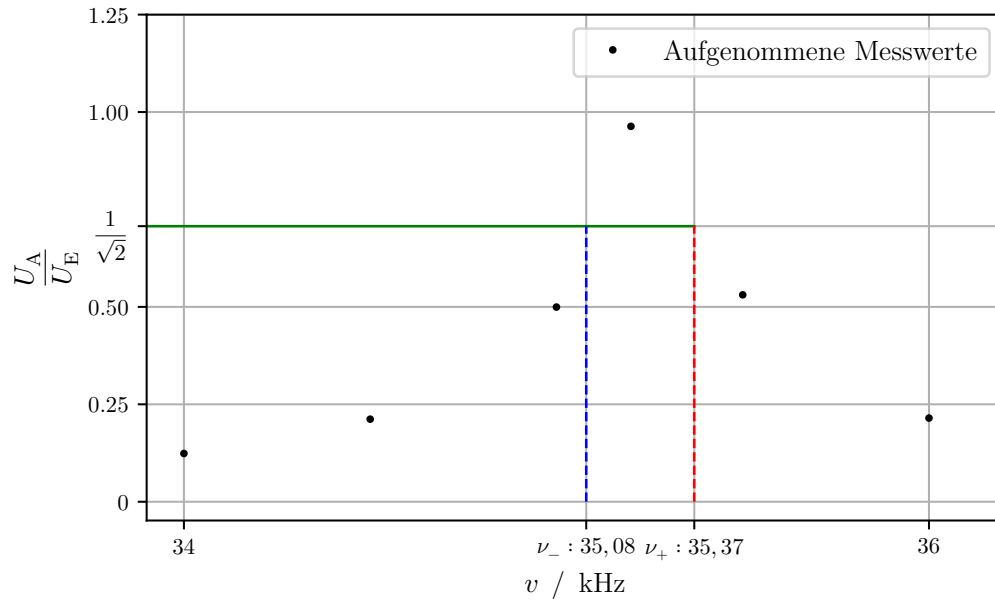
Durch eine Interpolation lassen sich nun die obere ( $v_+$ ) und die untere ( $v_-$ ) Grenzfrequenz, sowie die Durchlassfrequenz  $v_0$  ablesen,



$$v_- = 35,08 \text{ kHz}$$

$$v_0 = 35,20 \text{ kHz}$$

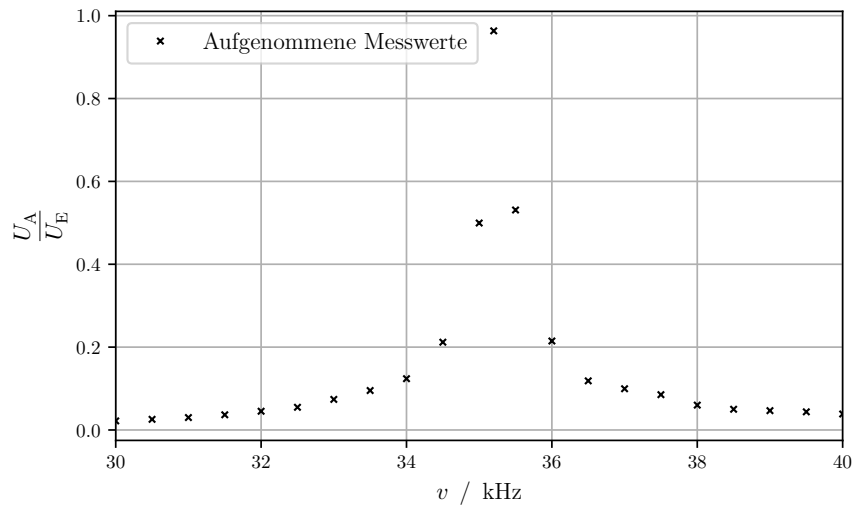
$$v_+ = 35,37 \text{ kHz}$$



**Abbildung 3:** Die Durchlasskurve des Selektivverstärkers in vergrößerter Ansicht.

Anhand dieser Werte kann nun die Gütezahl  $q$  des Selektivverstärkers wie folgt berechnet werden

$$q = \frac{v_0}{v_+ - v_-} = 121,37 \quad (12)$$



**Abbildung 4:** Die Durchlasskurve des Selektivverstärkers in vergrößerter Ansicht.

## 4.2 Bestimmung der Suszeptibilität

Die für diesen Versuch genutzten spezifischen Werte lauten

$$F = 86,6 \text{ mm}^2$$

$$T = 293,15 \text{ K}$$

$$n = 250$$

$$l = 135 \text{ mm}$$

Die Dichte für  $\text{C}_6\text{O}_{12}\text{Pr}_2$  wurde separat berechnet. Dabei wurde der Behälter als zylinderförmig mit dem Radius  $r = 5 \text{ mm}$  angenommen. Die anderen Dichten stammen aus der Versuchsanleitung.

**Tabelle 2:** Zur Berechnung genutzte Daten der Proben.

Probe	Querschnitt <sub>real</sub> $\text{mm}^2$	Dichte $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	mol. Masse $\frac{\text{g}}{\text{mol}}$
$\text{Gd}_2\text{O}_3$	11,89	7,40	362
$\text{Nd}_2\text{O}_3$	7,76	7,24	336
$\text{C}_6\text{O}_{12}\text{Pr}_2$	78,54	6,30	546

#### 4.2.1 Bestimmung der Suszeptibilität über Widerstandswerte

Mittels der Gleichung (11) kann die Suszeptibilität  $\chi_R$  bestimmt werden. Der Querschnitt der Spule ist aus den versuchsspezifischen Werten zu entnehmen.

In der Tabelle 3 können die aufgenommenen Messwerte betrachtet werden.

**Tabelle 3:** Widerstandsmessungen verschiedener Proben.

Probe	$R_{\text{ohne}} / \text{m}\Omega$	$R_{\text{Probe}} / \text{m}\Omega$	$\Delta R / \text{m}\Omega$
$\text{Nd}_2\text{O}_3$	4650	4345	305
	3115	3005	110
	3110	3015	95
$\text{Gd}_2\text{O}_3$	4575	3825	750
	4669	3820	849
	3110	2335	775
$\text{C}_6\text{O}_{12}\text{Pr}_2$	3110	3060	50
	3125	3065	60
	3130	3070	60

Um keine zu großen Abweichungen in der Messreihe zu haben, werden die Messungen mit den größten Abweichungen von der Tabelle gestrichen. Die ermittelten Suszeptibilitäten sind in der Tabelle 4 dargestellt. Hierbei stellt  $R_{3,4}$  den Wert des Widerstandspotentialmeters dar und beträgt  $998 \Omega$ .

**Tabelle 4:** Mittelwert der Widerstandsdifferenzen und die daraus ermittelte Suszeptibilität und ihr Fehler.

Probe	$\Delta \bar{R} / \text{m}\Omega$	$\chi_R$
$\text{Nd}_2\text{O}_3$	102,5	$22,92 \cdot 10^{-4}$
$\text{Gd}_2\text{O}_3$	762,5	$11,12 \cdot 10^{-4}$
$\text{C}_6\text{O}_{12}\text{Pr}_2$	57,0	$1,25 \cdot 10^{-4}$

Um die Theoriewerte zu bestimmen, wird die Gleichung (6) genutzt. Die Temperatur  $T$  wird als Zimmertemperatur angenähert und ist in den versuchsspezifischen Daten nachzusehen. Die benötigte Anzahl  $N$  der Momente pro Volumeneinheit ist in Tabelle 5 abgebildet und wird bestimmt durch die Dichte  $\rho$  dividiert durch der Molekülmasse  $M$ .

Um die jeweiligen Zustände der Proben zu ermitteln wird mit den Informationen aus [1] gearbeitet, und die Ergebnisse sind in der Tabelle 5 dargestellt. Um den benötigten Gesamtspin  $s$  zu bestimmen, wird die Elektronenkonfiguration der nicht abgeschlossenen Schalen in Betracht gezogen. Dabei wird jedem Elektron ein halbzahliger Spin von  $s = \frac{1}{2}$  zugeordnet. Der Drehimpuls  $l$  wird dann über die Konfiguration des  $4f$ -Orbitals berechnet, es gilt demnach  $l = 3$ . Den Elektronen wird dann der Bahndrehimpuls  $3, \dots, -3$  zugeordnet, mit der Bedingung, dass  $L$  maximal wird, ohne das Pauli-Prinzip zu verletzen. Die resultierende maximale Elektronenzahl lautet 14. Jedes Orbital wird dabei zunächst

**Tabelle 5:** Zustände der genutzten Proben [3] .

Probe	Drehimp. $L$	Ge.spin $S$	Ge.drehimp. $J$	molek. Mas. $M / \frac{kg}{10^{25}}$	Mom. pro Vol. $N / \frac{m^3}{10^{29}}$
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	3.5	3.5	6,019	8,134
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6	1.5	4.5	5,587	7,717
C <sub>6</sub> O <sub>12</sub> Pr <sub>2</sub>	6	1.5	4.5	9,064	0,143

mit Elektronen aufgefüllt, wobei nach sieben Elektronen wieder mit  $l_{\max} - 1$  angefangen wird zu zählen.

Die ermittelten theoretischen Werte und der Landé-Faktor sind in Tabelle 6 abgebildet.

**Tabelle 6:** Berechnete Theoriewerte und der Landé-Faktor.

Probe	Suszeptibilität $\chi_{\text{theo}}$	Landé-Faktor $gJ$
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$68,94 \cdot 10^{-4}$	2,00
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$15,21 \cdot 10^{-4}$	0,73
C <sub>6</sub> O <sub>12</sub> Pr <sub>2</sub>	$820,98 \cdot 10^{-4}$	0,73

#### 4.2.2 Bestimmung der Suszeptibilität über die Brückenspannung

Im letzten Teil der Versuchsreihe wird die Suszeptibilität über die Brückenspannung nach (11) bestimmt. Die Messungenauigkeit für  $\chi_U$  fällt hierbei weg, da die gemessene Brückenspannung nach Abgleichen der Brücke unabhängig vom Probenmaterial und den Widerstandswerten bei  $U_{\text{Br}} = 0,2 \text{ mV}$  liegt.

Die berechneten Suszeptibilitäten sind in Tabelle 7 dargestellt.

**Tabelle 7:** Über die Brückenspannung ermittelten Suszeptibilitäten.

Probe	$\chi_U \cdot 10^{-4}$
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,237
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,584
C <sub>6</sub> O <sub>12</sub> Pr <sub>2</sub>	26,190

## 5 Diskussion

Zunächst werden die über den Widerstand bestimmten Werte diskutiert. Die experimentell ermittelten und theoretischen Werte sind in Tabelle 8 dargestellt. Die teils sehr hohen Abweichungen sind darauf zurückzuführen, dass zunächst die zur Messung verwandte

**Tabelle 8:** Prozentuale Abweichung der experimentell ermittelten Werte  $\chi_R$  über Widerstände von den Theoriewerten.

Probe	exp. Wert $\chi_R/10^{-4}$	theoret. Wert $\chi_T/10^{-4}$	proz. Abw.
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,92	68,94	66,75 %
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,12	15,21	26,89 %
C <sub>6</sub> O <sub>12</sub> Pr <sub>2</sub>	1,25	820,98	99,84 %

Brückenschaltung ein inkonsistentes Verhalten gezeigt hat und die Brückenspannung beim Einführen der Probe gesunken ist. Da das Voltmeter zur Bestimmung der Brückenspannung außerdem stark schwankte und sich ein Widerstand, bei dem ein Spannungsminimum vorliegt, nicht exakt feststellen ließ, wurde für die weitere Versuchsdurchführung die Brückenschaltung gewechselt.

Gleiches gilt für die über die Brückenspannung bestimmten Werte für die Suszeptibilitäten. Die Ergebnisse und deren Abweichungen sind in Tabelle 9 dargestellt. Hier lassen

**Tabelle 9:** Prozentuale Abweichung der experimentell ermittelten Werte  $\chi_U$  über die Brückenspannung von den Theoriewerten.

Probe	exp. Wert $\chi_U/10^{-4}$	theoret. Wert $\chi_T/10^{-4}$	proz. Abw.
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,237	68,94	99,66 %
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,584	15,21	69,86 %
C <sub>6</sub> O <sub>12</sub> Pr <sub>2</sub>	26,190	820,98	96,81 %

sich die hohen Abweichungen ebenfalls durch die oben angeführten Gründe und den Wechsel der Brückenschaltung erklären. Außerdem lässt sich anfügen, dass die gemessenen Brückenspannungen sehr klein sind, sodass Störeinflüsse trotz Selektivverstärker noch eine große Rolle spielen. Dies war auch beim Ablesen der Messwerte zu erkennen, da das Messgerät nie einen eindeutigen Wert anzeigte, sondern auch bei der zweiten Apparatur ein wenig schwankte. Ein weiterer Grund könnte die Ungenauigkeit des Selektivverstärkers sein. Die am Gerät eingestellte Güte lag bei 100, der aus den Messwerten berechnete Wert liegt allerdings bei 121,37. Dies entspricht einer Abweichung von 21,37%, welche auch einen Einfluss auf die weiteren Messergebnisse gehabt haben kann.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zum Versuch V606*. 23. Apr. 2019. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/MEDPHYS/BACHELOR/AP/SKRIPT/V606.pdf>.
- [2] Lexikon der Physik. *Planck'sches Wirkungsquantum*. 23. Apr. 2019. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/plancksches-wirkungsquantum/11310>.
- [3] chemical portal. *elementare Zusammensetzung*. 23. Apr. 2019. URL: <https://de.webqc.org/mmcalc.php>.