

V606

# **Messung Suszeptibilität paramagnetischer Substanzen**

Robin Pelkner  
robin.pelkner@tu-dortmund.de

Joshua Althüser  
joshua.althueser@tu-dortmund.de

Durchführung: 04.06.2019

Abgabe: 11.06.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
<b>3 Durchführung</b>	<b>6</b>
<b>4 Auswertung</b>	<b>7</b>
4.1 Untersuchung der Filterkurve . . . . .	7
4.2 Theoretische Bestimmung der Suszeptibilitäten . . . . .	10
4.3 Experimentelle Bestimmung der Suszeptibilitäten . . . . .	11
<b>5 Diskussion</b>	<b>13</b>
<b>Literatur</b>	<b>14</b>

## 1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen die Suszeptibilitäten verschiedener paramagnetischer Seltener Erd Verbindungen untersucht werden.

## 2 Theorie

In Materie setzt sich die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  sowohl aus der magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$ , wie auch der Magnetisierung  $\vec{M}$  zusammen. Dabei gilt die Relation

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

wobei  $\mu_0$  die magnetische Feldkonstante ist. Die Magnetisierung wird durch die magnetischen Momente in der Materie hervorgerufen und hängt nach

$$\vec{M} = \mu_0 \chi \vec{H} \quad (2)$$

ebenfalls von der Feldstärke ab. Dabei ist  $\chi$  die sogenannte magnetische Suszeptibilität. Diese hängt sowohl von dem Material, von der magnetischen  $\vec{H}$ , als auch von der Temperatur  $T$  ab, welche für Änderungen in der Orientierung der Dipolmomente im Material sorgt.

An dieser Stelle sei gesagt, dass der hier zu untersuchende Paramagnetismus, im Gegensatz zum Diamagnetismus, nicht bei jedem Material auftritt. Das liegt daran, dass ersterer nur zu finden ist, wenn die Atome im Material einen endlichen Drehimpuls besitzen.

Im einem Atom liegen einerseits die Spins der Elektronen  $\vec{S}$  und deren Bahndrehimpulse  $\vec{L}$  vor. Dies setzt sich additiv zum Gesamtdrehimpuls  $\vec{J}$  zusammen. Damit sind die Dipolmomente durch

$$\vec{\mu}_L = -\frac{\mu_B}{\hbar} \vec{L} \quad (3)$$

$$\vec{\mu}_S = -g_S \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{S} \quad (4)$$

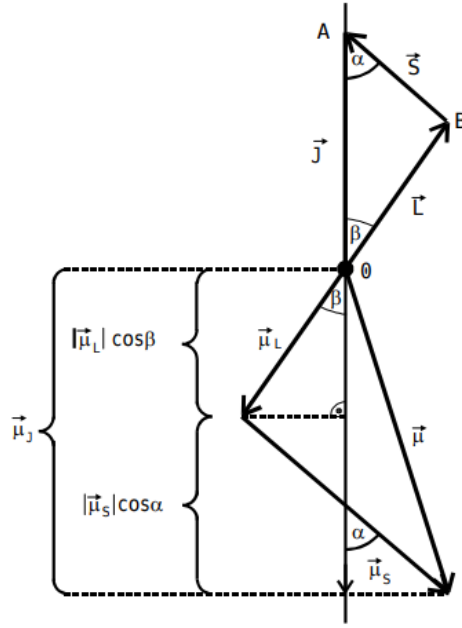
gegeben, wobei  $\mu_B$  das Bohr'sche Magneton und  $g_S$  das gyromagnetische Verhältnis ist. Des Weiteren liefert die Quantenmechanik für die Beträge von  $\vec{L}$ ,  $\vec{S}$  und  $\vec{J}$  die Relationen

$$|\vec{L}| = L = \sqrt{L(L+1)}\hbar \quad (5)$$

$$|\vec{S}| = S = \sqrt{S(S+1)}\hbar \quad (6)$$

$$|\vec{J}| = J = \sqrt{J(J+1)}\hbar. \quad (7)$$

Mit den Winkelbeziehungen in Abbildung 1 und der Näherung  $g_S \approx 2$  lässt sich das magnetische Moment zum Gesamtdrehimpuls als



**Abbildung 1:** Skizze zur Vektoraddition der Drehimpulse und der magnetischen Momente im Atom [1].

$$\mu_J = g_J \cdot \mu_B \sqrt{J(J+1)} \quad (8)$$

schreiben, wobei

$$g_J := \frac{3J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (9)$$

der Landé-Faktor ist. Des Weiteren kann die Richtung von  $\vec{\mu}_J$  nicht beliebig sein. Für die  $z$ -Komponente ergibt sich

$$\mu_{J,z} = -\mu_B g_J m, \quad (10)$$

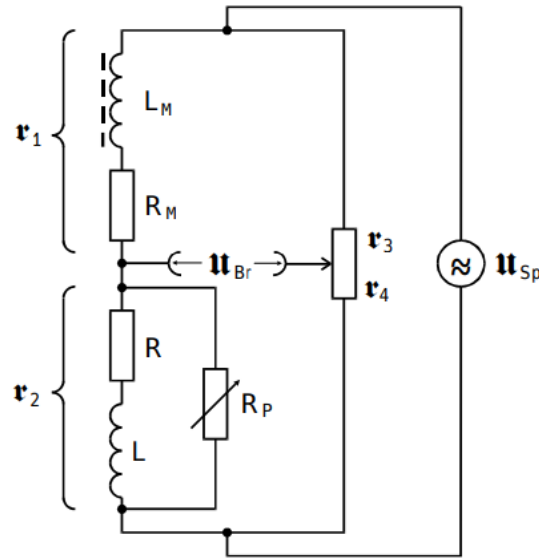
wobei  $m \in \{-J, J+1, \dots, J-1, J\}$  die magnetische Quantenzahl ist. Also gibt es eine diskrete Menge von möglichen Winkeln, welche jeweils eine potentielle Energie innehaben. Mit dieser kann die Magnetisierung bestimmt werden. Dazu wird die Häufigkeit des Auftretens der einzelnen Orientierungen berechnet und mit dem entsprechenden magnetischen Moment multipliziert. Diese Werte werden anschließend aufsummiert. Damit kann die Suszeptibilität über

$$\chi = \mu_0 \mu_B^2 g_J^2 \frac{NJ(J+1)}{3kT} \quad (11)$$

beschrieben werden. Dabei ist  $k$  die Boltzmann-Konstante und  $N$  die Anzahl der magnetischen Momente pro Volumeneinheit.

Bei Atomen der Seltenen Erden sind in der 4f-Schale die Elektronen so angeordnet, dass diese einen endlichen Drehimpuls liefern. Daher lässt sich bei diesen Elementen der Paramagnetismus gut beobachten. Diese Anordnung und der zugehörige Gesamtdrehimpuls lässt sich mit den Hund'schen Regeln beschreiben:

1. Die einzelnen Spins  $\vec{s}_i$  kombinieren sich so nach dem Pauli-Prinzip, dass der Gesamtspin  $\vec{S} = \sum \vec{s}_i$  maximal wird.
2. Die einzelnen Bahndrehimpulse  $\vec{l}_i$  ordnen sich so an, dass der Gesamtdrehimpuls  $\vec{L} = \sum \vec{l}_i$  maximal wird, allerdings zugleich Regel 1 und das Pauli-Prinzip gelten.
3. Der Gesamtdrehimpuls ergibt sich zu  $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$ , sollte die Schale mehr als halb gefüllt sein, beziehungsweise zu  $\vec{J} = \vec{L} - \vec{S}$ , wenn sie weniger als zur Hälfte gefüllt ist.



**Abbildung 2:** Schaltskizze der Brückenschaltung, welche zur Suszeptibilitätsmessung verwendet wird [1].

Zur experimentellen Bestimmung der Suszeptibilität wird eine Brückenschaltung, wie in Abbildung 2 zu sehen, verwendet. Jene beruht auf einer Induktivitätsdifferenz zwischen einer mit Luft und einer mit Material gefüllten Spule. Daher müssen die beiden Induktivitäten der beiden Spulen möglichst gleich sein.

Zur Bestimmung der Differenz können zwei Methoden verwendet werden. Für die erste wird die Brücke abgeglichen, sodass  $U_{Br} = 0$  gilt. Wenn nun ein Material in eine der beiden Spule geschoben wird, so ändert sich die Spannung der Brücke, sodass daraus  $\chi$  bestimmt werden kann. Dabei zeigt sich nach diversen Umformungen, dass für  $\omega^2 L^2 \gg R^2$ , die Relation

$$\chi = 4 \frac{F U_{Br}}{Q U_{Sp}} \quad (12)$$

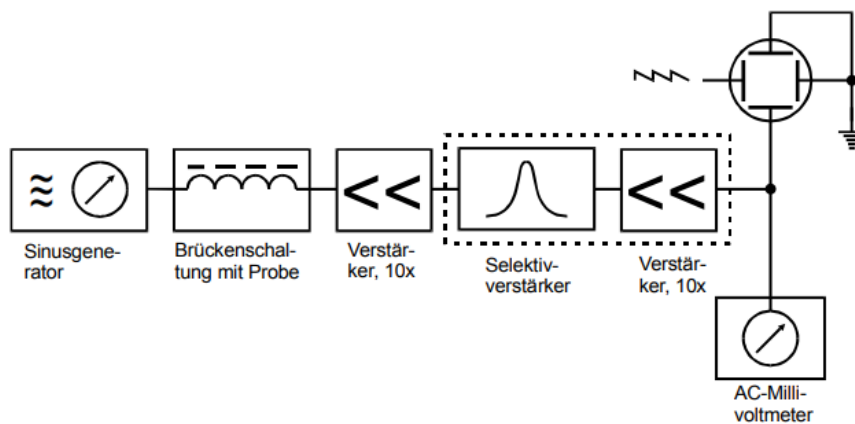
gilt, wobei  $F$  der Querschnitt der Spule und  $Q$  der der Probe und  $U_{Sp}$  die Speisespannung.

Für die zweite Methode wird nach dem Einführen des Materials die Brücke erneut abgeglichen. Aus der Differenz der Widerstände  $\Delta R$ , welche zum Abgleichen nötig sind, kann mittels

$$\chi = 2 \frac{F \cdot \Delta R}{R_3 Q} \quad (13)$$

die Suszeptibilität bestimmt werden. Dabei ist  $R_3$  der Widerstand am Potentiometer.

### 3 Durchführung



**Abbildung 3:** Blockschaltskizze des elektrischen Aufbaus, welcher zur Bestimmung der Suszeptibilität verwendet wird [1].

Da die Brückenspannung bei Brückenschaltungen immer von Störspannungen mitunter vollständig überdeckt wird, wird hier ein Selektivverstärker verwendet, welcher nur das im Versuch verwendete monofrequente Signal durchlässt und verstärkt.

Zunächst wird eben dieser Filter untersucht, um so die Frequenz zu bestimmen, für die er filtert. Dazu wird ein Sinussignalsynthesizer an den Selektivverstärker angeschlossen und es werden Frequenzen von 20 kHz bis 40 kHz eingestellt und die Ausgangsspannungen notiert. Um das Maximum herum wird die Schrittgröße verringert.

Der gesamte Aufbau zur Bestimmung der Suszeptibilität ist in Abbildung 3 zu sehen. Die Frequenz des Sinusgenerators wird auf die zuvor bestimmte Durchlassfrequenz des Filters gestellt.

Zunächst wird die Brückenschaltung mit den Abstimmelementen  $R_3$  und  $R_4$  sowie  $R_P$  abgeglichen. Erstere bleiben für den Verlauf des Versuches unverändert. Die nun abgeglichene Brückenspannung sowie  $R_P$  werden notiert. Nun wird die Probe in die Spule eingeführt und die neue Brückenspannung wird notiert. Anschließend wird die Schaltung

erneut abgeglichen. Der neue  $R_P$ -Wert wird ebenfalls aufgeschrieben. Dieser Prozess wird für jedes Material 3 mal wiederholt.

Die verwendeten Materialien sind  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  und  $\text{C}_6\text{O}_{12}\text{Pr}_2$ .

## 4 Auswertung

### 4.1 Untersuchung der Filterkurve

In diesem Teil des Versuches wird zunächst die Durchlassfrequenz  $\nu_A$  des Selektivverstärkers bestimmt, wobei eine Eingangsspannung  $U_E = 100 \text{ mV}$  verwendet wird. Es sei außerdem erwähnt, dass hier mit einer Verstärkung um den Faktor 100 gearbeitet wird. Die gemessenen Frequenzen  $\nu$  und die Spannungen  $U$  sind in Tabelle 1 zu sehen. Die Spannungen werden gegen die Frequenzen aufgetragen, was in Abbildung 4 zu sehen ist. Außerdem wird eine Lorentzkurve

$$U = \frac{a}{(\nu^2 - \nu_A^2)^2 + b^2 \nu_A^2} \quad (14)$$

durch die Messwerte von 34 kHz bis 36 kHz mittels des Python 3.7.0 Paketes Curve Fit gelegt. Die Parameter ergeben sich dadurch zu

$$\begin{aligned} \nu_A &= (35,375 \pm 0,007) \text{ kHz}, \\ a &= (6,9 \pm 0,3) \cdot 10^4 \frac{\text{V}}{\text{s}^4}, \\ b &= (-0,71 \pm 0,02) \frac{1}{\text{s}^2}. \end{aligned}$$

Des Weiteren wird eine Gerade bei  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  der Maximalspannung  $U_{\max} = (107 \pm 9) \text{ V}$  parallel zur Frequenzachse gelegt. Die Schnittpunkte mit der Lorentzkurve sind bei den Frequenzen

$$\begin{aligned} \nu_+ &= (35,146 \pm 0,007) \text{ kHz} \\ \nu_- &= (35,601 \pm 0,007) \text{ kHz} \end{aligned}$$

gegeben. Dadurch ergibt sich die Güte

$$Q = \frac{\nu_A}{\nu_- - \nu_+} \quad (15)$$

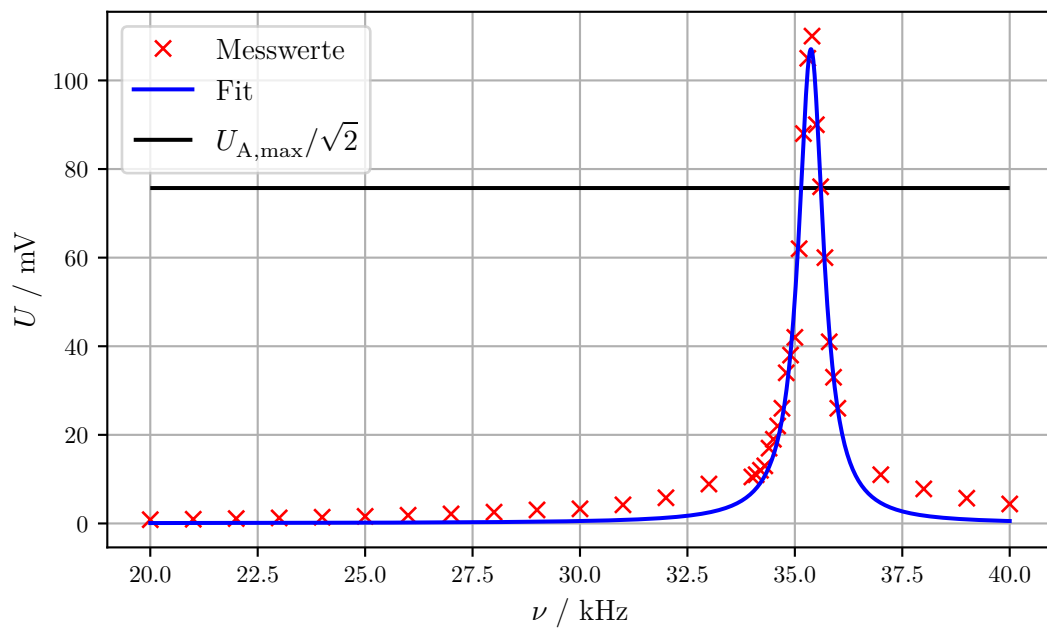
zu

$$Q = 77,8 \pm 1,7.$$

**Tabelle 1:** Messwerte der Filterkurve des Selektivverstärkers.

Frequenz $\nu$ / kHz	Spannung $U$ / mV	Frequenz $\nu$ / kHz	Spannung $U$ / mV
20.0	0.85	34.5	19.00
21.0	0.95	34.6	22.00
22.0	1.10	34.7	26.00
23.0	1.25	34.8	34.00
24.0	1.40	34.9	38.00
25.0	1.60	35.0	42.00
26.0	1.85	35.1	62.00
27.0	2.15	35.2	88.00
28.0	2.55	35.3	105.00
29.0	3.05	35.4	110.00
30.0	3.30	35.5	90.00
31.0	4.20	35.6	76.00
32.0	5.80	35.7	60.00
33.0	8.90	35.8	41.00
34.0	10.50	35.9	33.00
34.1	11.00	36.0	26.00
34.2	12.00	37.0	11.00
34.3	13.00	38.0	7.80
34.4	17.00	39.0	5.70
		40.0	4.40





**Abbildung 4:** Plot der gemessenen Spannungen gegen die Frequenz mit Lorentzkurvenfit und Gerade zur Bestimmung der Durchlassfrequenz und der Güte.

## 4.2 Theoretische Bestimmung der Suszeptibilitäten

Die Suszeptibilitäten der hier betrachteten Stoffe lassen sich nach Gleichung (11) bestimmen. Der benötigte Lande-Faktor  $g_J$ , sowie die Größen  $L$ ,  $S$  und  $J$  der verschiedenen Stoffe sind in Tabelle 2 aufgeführt. Des Weiteren zu sehen sind darin die Dichte  $\rho$ , die Masse  $m$ , die zugehörige molare Masse  $M$  und die Zahl der magnetischen Momente pro Volumeneinheit  $N$ , welche sich nach

$$N = 2 \cdot \frac{\rho}{M} N_A \quad (16)$$

berechnen, wobei  $N_A$  die Avogadrokonstante ist. Die Werte von  $J$ ,  $L$  und  $S$  werden durch Betrachtung der 4f-Elektronen der Stoffe bestimmt. Dabei ist zu Beachten, dass je nach Anzahl dieser Elektronen die Möglichkeiten die Spins anzuordnen variieren. Nach den Hundschen Regeln sollen diese maximiert werden, wobei zu Beachten ist, dass es die Quantenmechanik nicht zulässt, dass zwei Elektronen eines Atoms nicht in allen Quantenzahlen übereinstimmen. Dies wird beispielhaft für  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  gezeigt. Dieser Stoff hat 9 4f Elektronen. Nach der Hundschen Regel ergibt sich  $L = -3 - 2 - 1 - 0 + 1 = -5$ , wobei der Betrag betrachtet wird. Der Wert für  $S$  ergibt sich außerdem zu  $S = 7 \cdot \frac{1}{2} - 2 \cdot \frac{1}{2} = 5$ . Damit bestimmt sich  $J$  zu  $J = L - S = 4,5$ . Diese Werte sowie die Dichten  $\rho$ , die Massen  $m$ , molaren Massen  $M$  und die Teilchenanzahl pro Volumeneinheit  $N$  sind in Tabelle 2 zu sehen. Außerdem ist der Landefaktor dargestellt, welcher sich nach Gleichung (9) berechnet. In dieser Rechnung wird eine Raumtemperatur von  $T = 293,15$  K angenommen.

**Tabelle 2:** Materialeigenschaften der Seltenen Erd Verbindungen zur Bestimmung der Theoriewerte der Suszeptibilität.

	$\text{Nd}_2\text{O}_3$	$\text{Gd}_2\text{O}_3$	$\text{Dy}_2\text{O}_3$	$\text{C}_6\text{O}_{12}\text{Pr}_2$
4f-Elektronen	3	7	9	3
$L$	6	0	5	5
$S$	1,5	3,5	2,5	1
$J$	4,5	3,5	7,5	4
$g_J$	0,73	2,0	1,33	0,73
$\rho / \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	7240	7400	7800	6260
$m / \text{kg}$	0,009	0,0141	0,0151	0,0079
$M / \frac{\text{g}}{\text{mol}}$	336	362	373	544
$N / 10^{28} \frac{1}{\text{m}^3}$	2,59	2,46	2,52	1,38

Durch Anwenden von Gleichung (11), unter Verwendung der Werte aus Tabelle 2, ergeben

sich die gesuchten Suszeptibilitäten der verschiedenen Stoffe zu

$$\begin{aligned}\chi_{\text{Nd}_2\text{O}_3} &= 0,003 \\ \chi_{\text{Gd}_2\text{O}_3} &= 0,014 \\ \chi_{\text{Dy}_2\text{O}_3} &= 0,025 \\ \chi_{\text{C}_6\text{O}_{12}\text{Pr}_2} &= 0,001.\end{aligned}$$

### 4.3 Experimentelle Bestimmung der Suszeptibilitäten

Die experimentelle Bestimmung der Suszeptibilitäten verläuft nach Gleichung (12) und (13), wobei das dort verwendete  $Q$  durch den Querschnitt

$$Q_{\text{real}} = \frac{m}{\rho l} \quad (17)$$

ersetzt wird. Dieser entspricht dem Querschnitt, welcher aufträte wenn die Probe nur aus einem Einkristall bestünde. Hierbei ist  $m$  die Masse der Probe,  $\rho$  die Dichte der Probe und  $l$  die Länge der Probe. Letztere beträgt bei allen Proben  $l = 135$  mm. Masse und Dichte der Proben sind in Tabelle 2 zu sehen. Die berechneten Querschnitte sind in Tabelle 3 zu sehen. Des Weiteren wird eine Eingangsspannung von  $U_{\text{Speis}} = 0,5$  V

**Tabelle 3:** Querschnitte der untersuchten Proben.

Probe	$Q_{\text{real}}/10^{-5}\text{m}^2$
$\text{Nd}_2\text{O}_3$	0.921
$\text{Gd}_2\text{O}_3$	1.411
$\text{Dy}_2\text{O}_3$	1.434
$\text{C}_6\text{O}_{12}\text{Pr}_2$	0.935

verwendet und wie schon im Versuchsteil zuvor eine Gesamtverstärkung des Signals um den Faktor 100. In Tabelle 4, 5, 6 und 7 sind die gemessenen Werte zu sehen. Hierbei bezeichnet  $U_0$  beziehungsweise  $R_0$  die anfangs gemessene Spannung beziehungsweise Widerstand, also ohne Probe in der Spule, während  $U_P$  und  $R_P$  die gemessenen Werte mit in die Spule eingeführter Probe sind. Des Weiteren sind die Differenzen  $\Delta R$  und  $\Delta U$  ebenfalls dargestellt. Über diese Differenzen wird mit Python 3.7.0 gemittelt.

**Tabelle 4:** Messwerte und zugehörige Differenzen von  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ .

$U_0 / \text{mV}$	$R_0 / \Omega$	$U_P / \text{mV}$	$R_P / \Omega$	$\Delta R / \Omega$	$\Delta U / \text{mV}$
8.1	2.600	8.1	2.535	0.065	0
8.1	2.650	8.3	2.520	0.13	0.2
8.1	2.630	8.1	2.490	0.14	0

Die gemittelten Werte sind in Tabelle 8 zu sehen. Nach Gleichung (12) und (13) lässt

**Tabelle 5:** Messwerte und zugehörige Differenzen von  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ .

$U_0 / \text{mV}$	$R_0 / \omega$	$U_P / \text{mV}$	$R_P / \omega$	$\Delta R / \omega$	$\Delta U / \text{mV}$
6.5	2.655	12.0	1.780	0.875	5.5
7.0	2.605	11.5	1.800	0.805	4.5
6.5	2.635	12.0	1.770	0.865	5.5

**Tabelle 6:** Messwerte und zugehörige Differenzen von  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ .

$U_0 / \text{mV}$	$R_0 / \Omega$	$U_P / \text{mV}$	$R_P / \Omega$	$\Delta R / \Omega$	$\Delta U / \text{mV}$
7.9	2.565	21.5	1.055	1.510	13.6
6.5	2.605	21.0	1.055	1.550	14.5
6.5	2.635	22.0	1.030	1.605	15.5

**Tabelle 7:** Messwerte und zugehörige Differenzen von  $\text{C}_6\text{O}_{12}\text{Pr}_2$ .

$U_0 / \text{mV}$	$R_0 / \Omega$	$U_P / \text{mV}$	$R_P / \Omega$	$\Delta R / \Omega$	$\Delta U / \text{mV}$
8.2	2.665	8.1	2.570	0.095	0.1
8.0	2.650	8.0	2.540	0.110	0
8.0	2.670	8.0	2.530	0.140	0

**Tabelle 8:** Gemittelte Spannungs- und Widerstandsdifferenzen.

Probe	$\Delta \bar{U} / \text{mV}$	$\Delta \bar{R} / \Omega$
$\text{Nd}_2\text{O}_3$	$0.07 \pm 0.07$	$0.11 \pm 0.02$
$\text{Gd}_2\text{O}_3$	$5.2 \pm 0.3$	$0.85 \pm 0.02$
$\text{Dy}_2\text{O}_3$	$14.5 \pm 0.5$	$1.55 \pm 0.03$
$\text{C}_6\text{O}_{12}\text{Pr}_2$	$0.03 \pm 0.03$	$0.11 \pm 0.01$

sich die Suszeptibilität einmal über den Widerstand und einmal über die Spannung bestimmen. Dabei werden die gemittelten Werte aus Tabelle 8 verwendet. Des Weiteren ist  $F = 86,6 \text{ mm}^2$  der Querschnitt der Spule und  $R_3 = 998 \Omega$  ein Ohmscher Widerstand. Die errechneten Suszeptibilitäten sind in Gleichung 11 dargestellt.

**Tabelle 9:** Berechnete Suszeptibilitäten.

Probe	$\chi_U$	$\chi_R$
$\text{Nd}_2\text{O}_3$	$(0,005 \pm 0,005)$	$(0,0021 \pm 0,0004)$
$\text{Gd}_2\text{O}_3$	$(0,25 \pm 0,02)$	$(0,0104 \pm 0,0003)$
$\text{Dy}_2\text{O}_3$	$(0,70 \pm 0,03)$	$(0,1882 \pm 0,0003)$
$\text{C}_6\text{O}_{12}\text{Pr}_2$	$(0,0025 \pm 0,0025)$	$(0,00213 \pm 0,00025)$

## 5 Diskussion

Der erste Versuchsteil verlief erwartungsgemäß. Die Durchlassfrequenz

$$\nu_A = (35,375 \pm 0,007) \text{ kHz}$$

weicht von den Angaben auf dem Gerät

$$\nu_A = 35 \text{ kHz}$$

um 1,07% ab, was als sehr gut gewertet werden kann und vor allem durch das Alter des verwendeten Gerätes erklärt werden kann. Die errechnete Güte von

$$Q = 77,8 \pm 1,7.$$

weicht um 22,2% vom eingestellten Wert  $Q = 100$  ab. Hier ist vorrangig die Messungenauigkeiten in der Nähe des Maximums zu beachten. Sowohl der Synthesizer als auch das verwendete Voltmeter waren starken Schwankungen unterworfen, was eine genaue Messung schwierig gestaltete. Zumal das Ablesen von der analogen Anzeige des Voltmeters ohnehin mit einer Ungenauigkeit behaftet ist.

Im zweiten Versuchsteil sind verschiedene Suszeptibilitäten bestimmt worden. Die experimentell bestimmten Werte werden dabei mit den zuvor theoretisch bestimmten Werten verglichen. Die Werte sowie die Abweichung vom jeweiligen Theoriewert ist in Tabelle 10 zu sehen. Die Abweichungen werden nach

$$\Delta\chi_i = \left| \frac{\chi_{\text{theoretisch}} - \chi_{\text{experimentell}}}{\chi_{\text{theoretisch}}} \right| \cdot 100 \quad (18)$$

berechnet. Wie zu sehen ist, sind die Abweichungen alle sehr groß. Dies liegt an den vielen Ungenauigkeiten bei diesem Versuch. Zum einen sind die Messgeräte nicht genau,

**Tabelle 10:** Vergleich zwischen den berechneten Suszeptibilitäten und den theoretischen.

Probe	$\chi_{\text{theoretisch}}$	$\chi_{\text{U}}$	$\Delta\chi_{\text{U}}$	$\chi_{\text{R}}$	$\Delta\chi_{\text{R}}$
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,003	(0,005 ± 0,005)	70%	(0,0021 ± 0,0004)	30%
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,014	(0,25 ± 0,02)	1710%	(0,0104 ± 0,0003)	25,5%
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,025	(0,70 ± 0,03)	2710%	(0,1882 ± 0,0003)	24,7%
C <sub>6</sub> O <sub>12</sub> Pr <sub>2</sub>	0,001	(0,0025 ± 0,0025)	150%	(0,00213 ± 0,00025)	113%

das heißt es kann ein großer Ablesefehler vorliegen, zumal wie auch schon im Teil zuvor die Nadel am Voltmeter geschwankt hat. Des Weiteren konnte die zuvor bestimmte Durchlassfrequenz nicht genau eingestellt werden, da die Skala am Generator zu grob ist. Hinzukommt, dass sich die Brückenspannung nicht genau auf 0 abgleichen ließ. Auch konnte der Innenwiderstand des Verstärkers nicht berücksichtigt werden, was ebenfalls eine Verfälschung darstellt. Die Suszeptibilitäten der einzelnen Stoffe sind zudem temperaturabhängig, weshalb diese nicht lange in der Hand oder in der Spule gehalten werden konnten. Die Ergebnisse der Messungen waren an sich nie rekonstruierbar, weshalb diese eher als Zufall beschrieben werden können. Es ist daher nicht möglich auf Grund dieser Ergebnisse physikalisch korrekte Aussagen zu treffen, da lediglich die Bestimmung über die Widerstände vertretbare Abweichungen aufweist (abgesehen von C<sub>6</sub>O<sub>12</sub>Pr<sub>2</sub>), was ersteinmal verständlich erscheint, da die Apparatur zur Bestimmung er Widerstände bis auf 5 mΩ genau ist. Da aber auch diese Messung mit dem selben Aufbau durchgeführt wurde, kann es sich hierbei auch um einen Zufall handeln, wobei der Effekt des Paramagnetismus generell sehr klein ist und sich Ungenauigkeiten daher umso stärker in den Ergebnissen auswirken.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *V606 - Messung Suszeptibilität paramagnetischer Substanzen*. 2019.