

GPET Versuch 5 — Hochspannung mit Stanley und Tesla

Gruppe: Dienstag14

Tim Luchterhand, Paul Nykiel
tim.luchterhand@uni-ulm.de, paul.nykiel@uni-ulm.de

16. Mai 2017

5.1 Spannungsübersetzung beim unbelasteten Transformator

Aufgabe In diesem ersten Versuchsteil sollen verschiedene Übersetzungsverhältnisse des unbelasteten Transformators betrachtet werden. Bauen Sie dazu die Schaltung mit $R_V = 100\Omega$ nach Abbildung 5.13 auf. Erzeugen Sie ein Sinuseingangssignal U_{Ein} mit Hilfe des Signalgenerators des Oszilloskops, $f = 500\text{Hz}$, $U = 1V_{pp}$.

Messen Sie jeweils für die verschiedenen Windungsverhältnisse gemäß Tabelle 5.1 die Primärspannung U_1 , die Sekundärspannung U_2 mit den beiden Kanälen des Oszilloskops und berechnen Sie das Verhältnis $\frac{U_2}{U_1}$. Übernehmen Sie Tabelle 5.1 in Ihr Protokoll und ergänzen Sie die zu ermittelnden Größen. Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse.

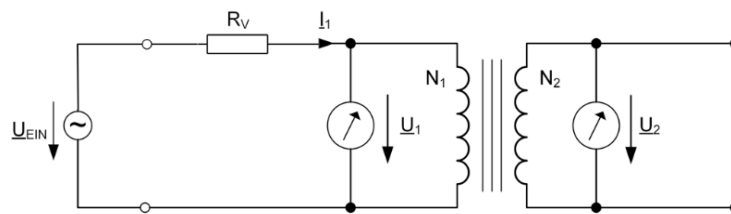


Abbildung 5.13: Versuchsaufbau des ersten Teilversuchs: unbelasteter Transformator

Protokoll

| N_1 | N_2 | U_1 mV _{pp} | U_2 mV _{pp} | $\frac{U_2}{U_1}$ |
|-------|-------|---------------------------|---------------------------|-------------------|
| 250 | 500 | 500 | 730 | 1.46 |
| 500 | 500 | 900 | 680 | 0.76 |
| 1000 | 500 | 1000 | 390 | 0.39 |
| 1000 | 250 | 1000 | 200 | 0.2 |

Tabelle 5.1: Messtabelle zu Versuch 5.1

Wir erwarten folgendes Verhalten:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

In der Realität zeichnet sich jedoch folgendes Verhalten ab

$$\begin{aligned}\frac{U_2}{U_1} &< \frac{N_2}{N_1} \\ \frac{4}{3} \cdot \frac{U_2}{U_1} &\approx \frac{N_2}{N_1} \\ \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} &\sim \frac{N_2}{N_1}\end{aligned}$$

Wie erwartet sind die beiden Verhältnisse zueinander proportional, jedoch nicht mit einem Proportionalitätsfaktor von 1, sondern von ca. $\frac{4}{3}$. Dies lässt sich durch die Unidealität des Transformators erklären, da durch Streufelder und den Ohmschen Widerstand der Spule Verluste entstehen.

5.2 Der belastete Transformator

Aufgabe In diesem Versuchteil soll der Einfluss verschiedener Lastwiderstände auf die Spannungstransformation bei zwei unterschiedlichen Windungsverhältnissen untersucht werden. Bauen Sie dazu die Schaltung mit $R_V = 100\Omega$ nach Abbildung 5.14 auf. Als Last R_L verwenden Sie ein Potentiometer ($0 \dots 1000\Omega$) dem Sie zusätzlich einen 100Ω Widerstand in Reihe schalten. Als Eingangssignal U_{Ein} stellen Sie am Signalgenerator des Oszilloskops ein Sinussignal der Spannung $1V_{pp}$ und der Frequenz $f = 500\text{Hz}$ ein.

Messen Sie für die Windungsverhältnisse $N_1 : N_2 = 500 : 500$ und $N_1 : N_2 = 250 : 500$ die Primärspannung U_1 sowie die Sekundärspannung U_2 für verschiedene Lastwiderstände ($100 \dots 1000\Omega$) gemäß Tabelle 5.2 und berechnen Sie zudem das Verhältnis $\frac{U_2}{U_1}$. Übernehmen Sie Tabelle 5.2 in ihr Protokoll und ergänzen Sie die zu ermittelnden Größen.

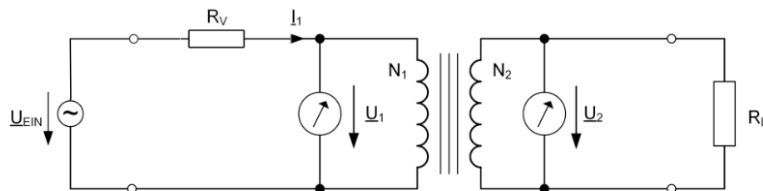


Abbildung 5.14: Versuchsaufbau des zweiten Teilversuchs: belasteter Transformator

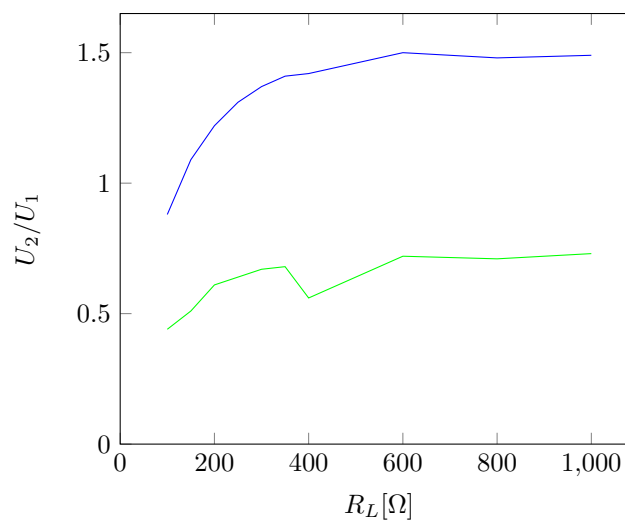
Tragen Sie für die beiden Windungsverhältnisse $N_1 : N_2 = 500 : 500$ und $N_1 : N_2 = 250 : 500$ das Spannungsübersetzungsverhältnis U_2/U_1 über den Lastwiderstand R_L auf und diskutieren Sie ihre Ergebnisse.

Protokoll

| R_L Ω | 500 : 500 | | | 250 : 500 | | |
|-------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|---------------------------|---------------------------|-----------|
| | U_1 mV_{pp} | U_2 mV_{pp} | U_2/U_1 | U_1 mV_{pp} | U_2 mV_{pp} | U_2/U_1 |
| 100 | 660 | 290 | 0.44 | 255 | 225 | 0.88 |
| 150 | 700 | 360 | 0.51 | 275 | 300 | 1.09 |
| 200 | 700 | 430 | 0.61 | 295 | 360 | 1.22 |
| 250 | 740 | 470 | 0.64 | 316 | 415 | 1.31 |
| 300 | 750 | 500 | 0.67 | 332 | 455 | 1.37 |
| 350 | 770 | 520 | 0.68 | 344 | 485 | 1.41 |
| 400 | 780 | 440 | 0.56 | 360 | 510 | 1.42 |
| 600 | 820 | 590 | 0.72 | 390 | 580 | 1.50 |
| 800 | 850 | 600 | 0.71 | 420 | 620 | 1.48 |
| 1000 | 860 | 630 | 0.73 | 430 | 640 | 1.49 |

Tabelle 5.2: Messtabelle zu Versuch 5.2

Windungsverhältnisse 500:500 in grün, 250:500 in blau.



Der Messpunkt der grünen Kurve bei einem Widerstand von 400Ω fällt klar aus der Messreihe heraus. Wir gehen von einem Messfehler aus.

Eigentlich würde man erwarten, dass beide Kurven konstant bleiben, da das Übertragungsverhältnis $\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1}$ sich nicht ändern sollte, die Windungszahlen bleiben ja schließlich gleich.

Beachtet man aber die Verluste, die bei einem nichtidealen Transformator auftreten, lässt sich das Verhalten folgendermaßen erklären. Ein Stromfluss im Sekundärkreis verursacht Energieverluste durch Streufelder, den Ohmschen Widerstand und die Gegeninduktivität M . Bei einem niedrigen Stromfluss sind diese Verluste entsprechend niedriger. Da ein hoher Lastwiderstand den Stromfluss beschränkt, verhält sich der Transformator mit zunehmendem Lastwiderstand immer idealer. Für den Extremfall $R_L \rightarrow \infty$ verhält sich das System wie in Aufgabe 5.1.

5.3 Kopplungsgrad

Aufgabe In diesem Versuchsteil soll der Kopplungsgrad k des Transformators ($N_1 : N_2 = 500 : 500$) bei den Frequenzen $f_1 = 500\text{Hz}$ und $f_2 = 5000\text{Hz}$ mit Hilfe der in Abschnitt 4.1 bestimmten Ausdrücke für L_1 , L_2 und M bestimmt werden. (Falls Sie diese Vorbereitungsaufgabe nicht lösen konnten, sprechen Sie mit Ihrem Tutor). Zur Berechnung von L_1 und M verwenden Sie den Aufbau nach 5.15 um die Größen U_1 und I_1 zu ermitteln. Als Eingangssignal erzeugen Sie wieder einen Sinus mit $U = 1V_{pp}$ mit Hilfe des Signalgenerators des Oszilloskops. ($R_V = 100\Omega$)

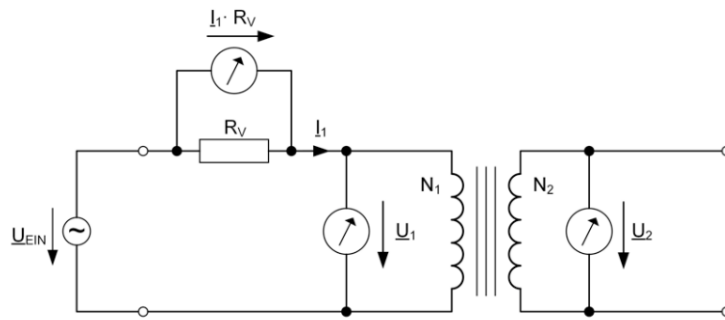


Abbildung 5.15: Aufbau zur Ermittlung des Kopplungsgrades

Für die Berechnung von L_2 muss der Primärstrom I_1 , sowie der Kurzschlussstrom I_2 ermittelt werden. Bauen Sie hierzu die Schaltung nach 5.16 auf. Geben Sie hier einen Sinus der Spannung $U = 2V_{pp}$ auf die Schaltung und messen Sie die beiden Ströme I_1 und I_2 mit Hilfe der schwarzen VOLTcraft-Multimeter (Messbereich mA, Wechselstrom) für die beiden Frequenzen f_1 und f_2 . Beachten Sie, dass das Multimeter beim Messen von Wechselgrößen den Effektivwert liefert!

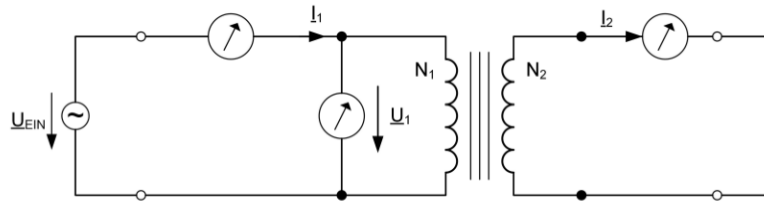


Abbildung 5.16: Versuchsaufbau für die Kurzschlussmessungen zur Bestimmung des Kopplungsgrades

Nachdem Sie die Größen L_1 , L_2 und M ermittelt haben, berechnen Sie den Kopplungsgrad k für die Frequenzen f_1 und f_2 und diskutieren Sie Ihre Ergebnisse.

Protokoll

$$N_2 = N_1 = 500$$

Für $f = 500\text{Hz}$:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= 306\text{mV}_{RMS} \\
 U_2 &= 234\text{mV}_{RMS} \\
 I_{1offen} &= 0.917\text{mA}_{RMS} \\
 \omega &= 2\pi f = 3142\text{Hz} \\
 L_1 &= \frac{U_1}{\omega I_{1offen}} = 0.106\text{H} \\
 M &= L_1 \frac{N_2}{N_1} = L_1 = 0.106\text{H} \\
 I_{1k} &= 2.01\text{mA}_{RMS} \\
 I_{2k} &= 1.49\text{mA}_{RMS} \\
 L_2 &= M \cdot \frac{I_{1k}}{I_{2k}} = 0.110\text{H} \\
 k &= \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = 0.98
 \end{aligned}$$

Für $f = 5000\text{Hz}$:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= 344\text{mV}_{RMS} \\
 U_2 &= 251\text{mV}_{RMS} \\
 I_{1offen} &= 0.136\text{mA}_{RMS} \\
 \omega &= 2\pi f = 31416\text{Hz} \\
 L_1 &= \frac{U_1}{\omega I_{1offen}} = 0.0805\text{H} \\
 M &= L_1 \frac{N_2}{N_1} = L_1 = 0.0805\text{mH} \\
 I_{1k} &= 0.199\text{mA}_{RMS} \\
 I_{2k} &= 0.132\text{mA}_{RMS} \\
 L_2 &= M \cdot \frac{I_{1k}}{I_{2k}} = 0.121\text{H} \\
 k &= \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = 0.814
 \end{aligned}$$

Es fällt auf, dass bei höherer Frequenz der Kopplungsgrad des Transformators sinkt. Das bedeutet, dass das System insgesamt schlechter überträgt, ein ideales System hätte einen Kopplungsgrad von 1.

Erklärung: Die Streuinduktivitäten eines nichtidealen Transformators speichern bei höherer Frequenz mehr Energie in ihren Magnetfeldern. Es geht also mehr Energie in diesen Streufeldern verloren, was dazu führt, dass der Kopplungsgrad abnimmt.

5.4 Frequenzabhängiges Übertragungsverhalten und Phasenschiebung unter Last

Aufgabe

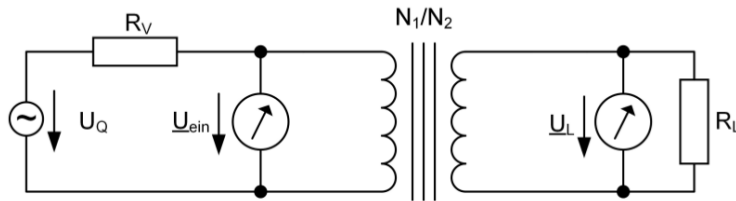


Abbildung 5.17: Versuchsaufbau zur Messung des Übertragungsverhalten bei verschiedenen Frequenzen.

In diesem letzten Aufgabenteil soll das frequenz- und lastabhängige Übertragungsverhalten des Transformators untersucht werden.

Messen Sie hierzu mit dem in 5.17 gezeigten Versuchsaufbau (Transformator mit $N_1 = N_2 = 500$ Windungen) die Spannungen U_{ein} und U_L mit Hilfe der beiden Eingangskanäle des Oszilloskops als Funktion der Frequenz für die drei Lastwiderstandswerte $R_L = \{100\Omega, 680\Omega, 1k\Omega\}$. Verwenden Sie hierfür die Sweep-Funktion der MATLAB GUI. Setzen Sie die Quellenspannung U_Q mit Hilfe der MATLAB GUI auf 1V (Z LOAD = high-Z). Nehmen Sie den Betrag und die Phase des Frequenzgangs der Übertragungsfunktion $U_2/U_1(\omega)$ für Frequenzen zwischen 100Hz und 100kHz (logarithmisch verteilt mit 100 Frequenzpunkten) für die drei oben genannten Lastwiderstandswerte auf (Hinweis: Ermitteln Sie zunächst den Amplitudengang mit der Funktion „Sweep — Frequency“ und anschließend den Phasengang mit der Funktion „Sweep — Phase“. Verwenden Sie bei der Ermittlung des Phasengangs zur Verbesserung der Qualität der Phasenmessung 4 Mittelungen).

Tragen Sie Betrag und Phase von $U_2/U_1(\omega)$ für die drei Lastwiderstandswerte in einem Bode-Diagramm auf. Diskutieren Sie Ihre Messwerte mit Hilfe Ihrer Ergebnisse aus Abschnitt 4.2.

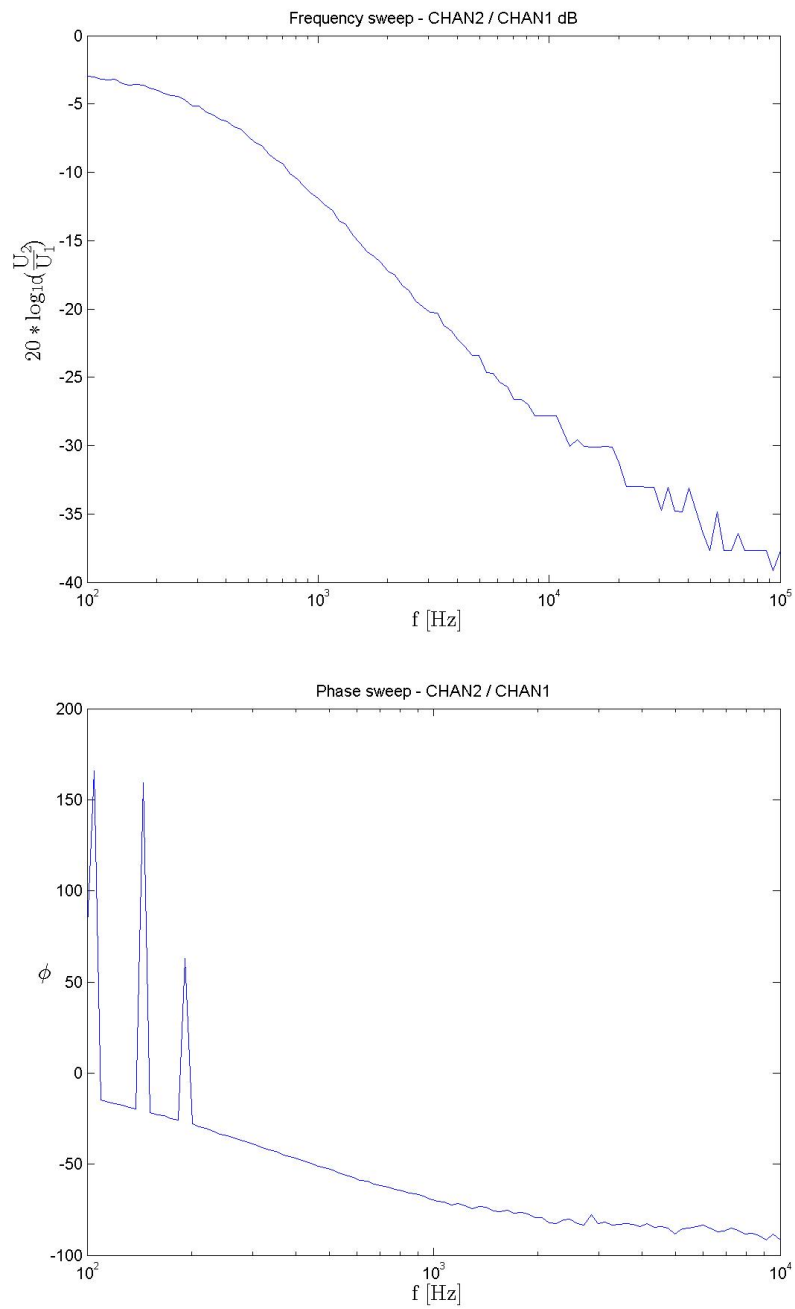
Protokoll Die in 4.2 errechente Übertragungsfunktion

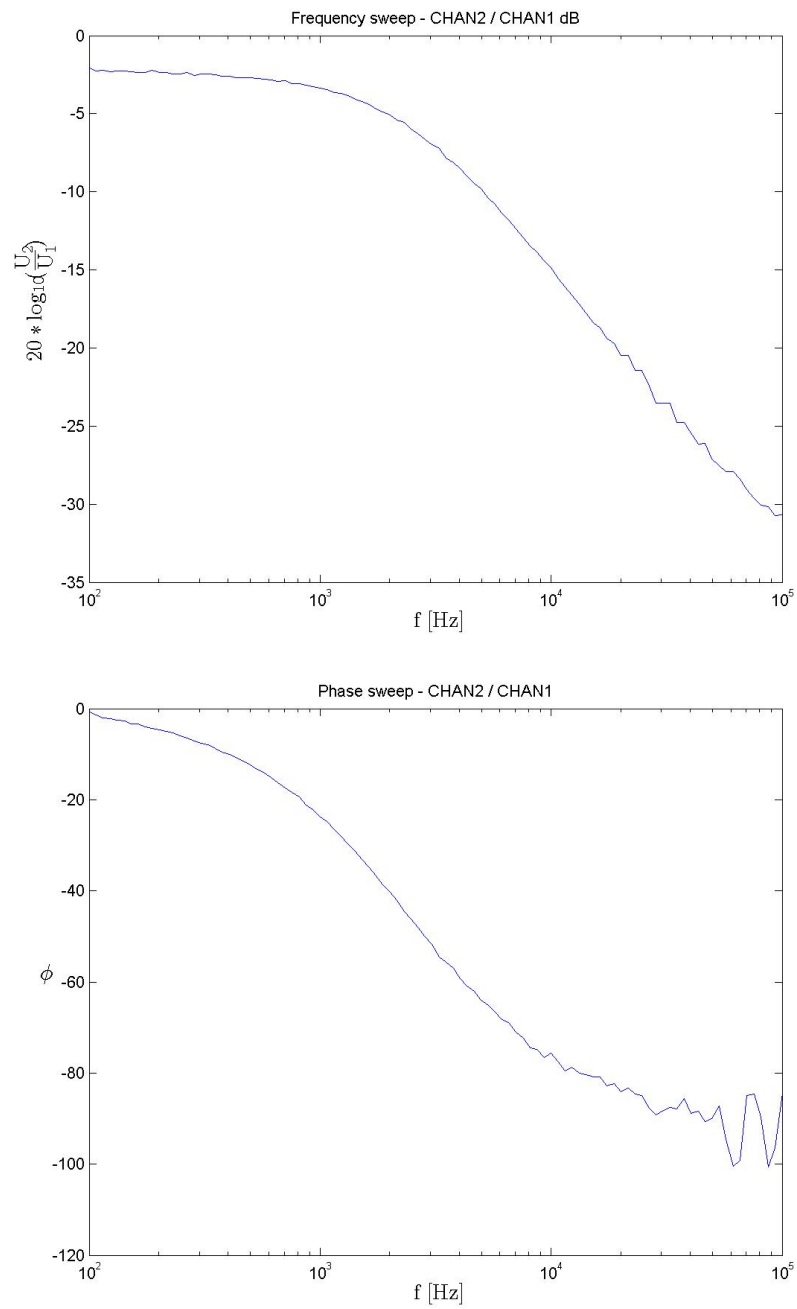
$$H = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_L \cdot N_2 \cdot L_{H_1}}{(j\omega L_{S_1} + R_L) \cdot N_1 (L_{H_1} + L_{S_1})}$$

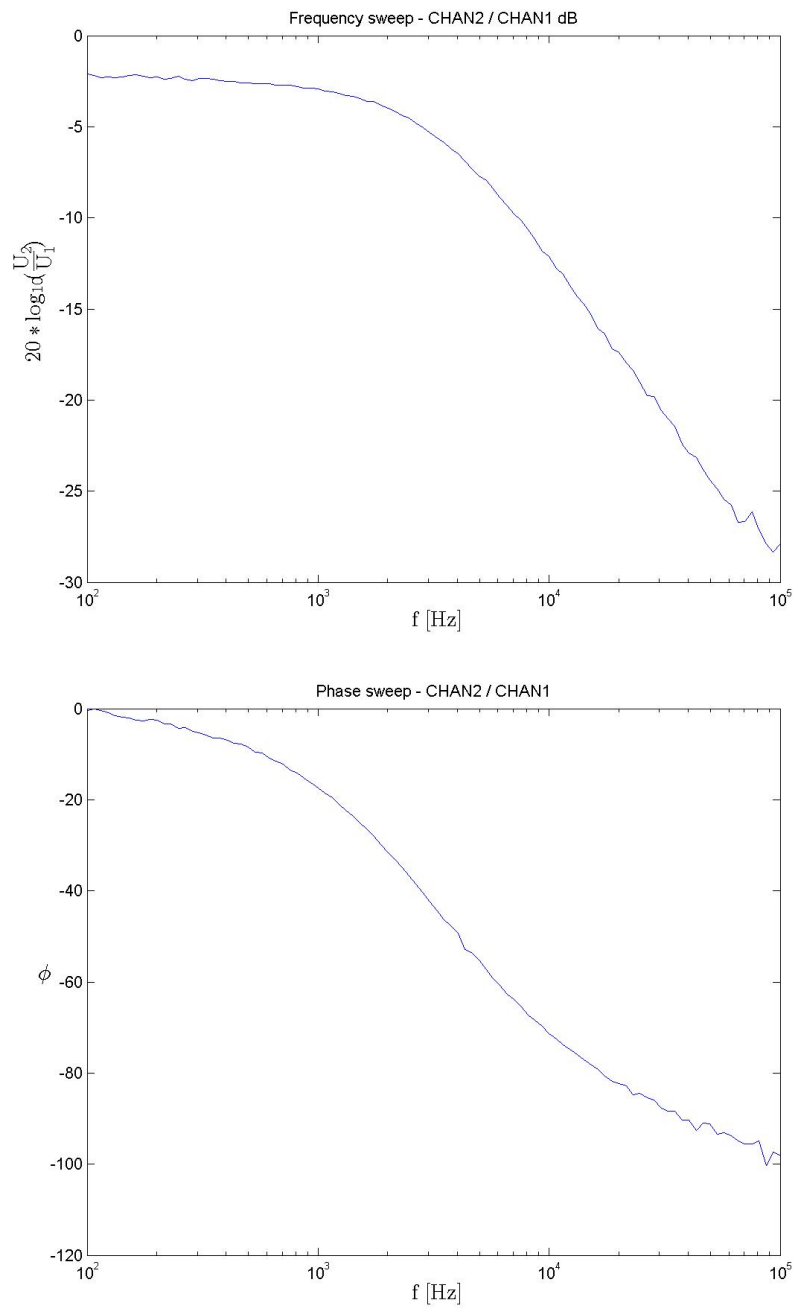
verhält sich für Extremwerte folgendermaßen:

$$\begin{aligned} H(\omega) &\rightarrow 0 \quad (\omega \rightarrow \infty) \\ \Rightarrow \frac{|H|}{\text{dB}} &\rightarrow -\infty \quad (\omega \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

Dieses Verhalten lässt sich auch in den folgenden Diagrammen erkennen: Für große Frequenzen nimmt die Übertragungsfunktion im logarithmischen Diagramm linear ab und geht im Grenzwert $\omega \rightarrow \infty$ gegen $-\infty$.

Abbildung 5.18: Bode-Diagramm mit $R_L = 100\Omega$

Abbildung 5.19: Bode-Diagramm mit $R_L = 680\Omega$

Abbildung 5.20: Bode-Diagramm mit $R_L = 1000\Omega$

Bemerkung:

Bei der Messung mit $R_L = 100\Omega$ wurde für das Phasendiagramm nur bis $f = 10^4\text{Hz}$ geplottet, da das Signal U_2 an der Sekundärwicklung für große Frequenzen sehr stark rauschte, was dann zu Fehlern während des Frequency-sweeps führte. Auch die auffälligen Peaks bei kleinen Frequenzen sind mit großer Sicherheit Messfehler, da sie stark vom zuvor berechneten Plot abweichen. Der generelle Verlauf ist aber trotzdem klar zu erkennen.