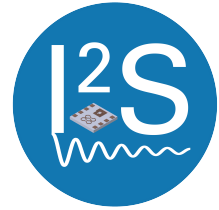


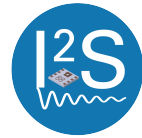
Universität Stuttgart
Institut für Intelligente Sensorik
und Theoretische Elektrotechnik



Grundlagenpraktikum Elektrotechnik

Basis 4: Der Transformator mit Stanley und Tesla

Institut für Intelligente Sensorik und Theoretische
Elektrotechnik
Universität Stuttgart



Grundlagenpraktikum Elektrotechnik

Versuch: Der Transformator mit Stanley und Tesla

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Funktionsprinzip des Transformators	2
3	Transformator ESBs	4
3.1	Idealer Transformator	4
3.2	Nichtideale magnetische Kopplung	4
3.3	Transformatorverluste und nichtideale Kopplung	6
4	Versuchsvorbereitung	7
4.1	Kopplungsgrad	7
4.2	Phasenschiebung unter Last	7
5	Versuchsdurchführung	8
5.1	Spannungsübersetzung beim unbelasteten Transformator	8
5.2	Der belastete Transformator	9
5.3	Kopplungsgrad	10
5.4	Frequenzabhängiges Übertragungsverhalten	11

1 Einleitung

Ziel dieses Versuches ist es, einen Überblick über Prinzip und Anwendungsmöglichkeiten des Transformators zu geben und einige für die Schaltungsanalyse wichtige Ersatzschaltbilder vorzustellen.

Ein Transformator gestattet die Kopplung von mindestens zwei Stromkreisen über ein (zeitliche variables) magnetisches Feld. In der Praxis können die miteinander gekoppelten Spulen dabei auf einem magnetischen Kern oder einem nichtmagnetischen Wickelkörper aufgebracht sein. Hierbei ist zu beachten, dass unabhängig von der Ausführung der magnetischen Kopplung die Stromkreise galvanisch stets isoliert sind.

Aufgrund dieser Eigenschaften kann ein Transformator dazu genutzt werden, Wechselstromleistung bei einer gegebenen Frequenz in Wechselstromleistung mit anderen Spannungs- und Strompegeln umzuformen. Hierdurch wird es ermöglicht, ein Netzwerk in galvanisch getrennte Teilnetzwerke zu untergliedern und die Spannungs- und Strompegel in den jeweiligen Teilnetzwerken optimal an die jeweiligen Anforderungen anzupassen.

Aus diesen Grundeigenschaften ergeben sich viele Anwendungsgebiete für den Transformator:

1. Transformation von Strömen und Spannungen:

In der Energietechnik kann der Transformator zur Verringerung der ohmschen Verluste bei der Übertragung der im Kraftwerksgenerator erzeugten Leistung zum Verbraucher eingesetzt werden. Hierzu wird die Ausgangsspannung der Kraftwerksgeneratoren (ca. 10 kV bis 25 kV) auf ein relativ hohes Spannungsniveau (üblicherweise 220 kV, 380 kV oder 750 kV) umgesetzt und umgekehrt beim Verbraucher wieder auf typische Werte von 220 V bis 600 V herabtransformiert.

2. Potentialtrennung:

Aus Sicherheitsgründen, aber auch z.B. aus messtechnischen Gründen ist es oft notwendig oder vorteilhaft, mit Hilfe von "Trenntransformatoren" eine Potentialtrennung von Wechselstromkreisen vorzunehmen

3. Trennung von Gleich- und Wechselstromanteilen:

Der Transformator überträgt nur die Wechselanteile eines Signals, somit können Gleich- und Wechselanteile voneinander getrennt werden. Der Gleichanteil verursacht dabei eine Vormagnetisierung des Transformator-kerns.

Überlegen Sie sich, welchen (negativen) Effekt diese Vormagnetisierung bzgl. des Übertragungsverhaltens des Transformators bewirken kann!

4. Widerstandstransformation/ Leistungsanpassung:

Während im Bereich der Energietechnik vorrangig ein maximaler Wirkungsgrad angestrebt wird, spielt im Bereich der Nachrichtentechnik der Begriff der "Anpassung" eine dominierende Rolle. Durch den Einsatz eines Transformators gelingt es, durch Widerstandstransformation einen gegebenen Lastwiderstand an eine Strom- bzw. Spannungsquelle "anzupassen", d.h. der Quelle kann die maximale Leistung entzogen werden.

In welchen Wert bzgl. des Quelleninnenwiderstandes muss der Lastwiderstand hierzu transformiert werden?

2 Funktionsprinzip des Transformators

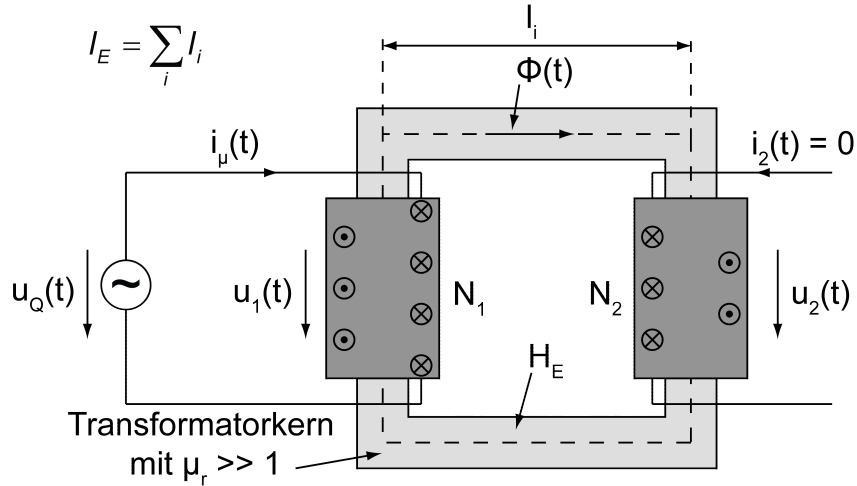


Abbildung 1: Illustration zur Funktionsweise des Transformators

Abb. 1 zeigt die schematische Darstellung eines Transformators im Leerlaufbetrieb. Gemäß der Abbildung besteht ein Transformator aus zwei Spulen, der sogenannten Primär- und Sekundärwicklung, die von einem gemeinsamen magnetischen Fluss $\Phi(t)$ durchflossen werden. Wie dargestellt wird dabei häufig die Kopplung der beiden Spulen durch Verwendung eines Transformator-kerns aus einem hochpermeablen Material, mit einer relativen Permeabilität $\mu_r \gg 1$, maximiert.

Die prinzipielle Funktionsweise des Transformators lässt sich nun wie folgt beschreiben. Bei Anlegen einer zeitlich veränderlichen Spannung $u_Q(t)$ an die Primärwicklung wird in der Primärwicklung gemäß des Induktionsgesetzes $u_1(t) = N_1 \cdot d\Phi(t)/dt$ (N_1 ist die Anzahl der Windungen der primärseitigen Wicklung) eine Spannung induziert, so dass im Primärkreis der Kirchhoff'sche Maschensatz $\sum_i u_i(t) = 0$ erfüllt ist. Der zur Einstellung des primärseitigen Spannungsgleichgewichts benötigte zeitlich veränderliche magnetische Fluss $\Phi(t)$ durchfließt bei idealer magnetischer Kopplung zwischen Primär- und Sekundärwicklung vollständig die Sekundärwicklung und induziert in der Sekundärwicklung eine Spannung gemäß $u_2(t) = N_2 \cdot d\Phi(t)/dt$. Insgesamt ergibt sich somit für den idealen Transformator im Leerlauf folgendes Verhältnis zwischen der Quellenspannung $u_Q(t)$, der in der Primärwicklung induzierten Spannung $u_1(t)$, sowie der in der Sekundärwicklung induzierten Spannung $u_2(t)$:

$$u_Q(t) = u_1(t) = N_1 \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (1a)$$

$$u_2(t) = N_2 \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (1b)$$

$$\Rightarrow u_2(t) = \frac{N_2}{N_1} \cdot u_1(t). \quad (1c)$$

Der primärseitig zur Erzeugung des magnetischen Flusses benötigte Magnetisierungsstrom $i_\mu(t)$ lässt sich aus dem Durchflutungssatz berechnen:

$$N_1 \cdot i_\mu(t) = H_E \cdot l_E, \quad (2)$$

wobei H_E die mittlere magnetische Feldstärke im Transformator Kern und l_E die mittlere Weglänge im Transformator Kern sind. Der Zusammenhang zwischen Gln. (1a), (1b) und Gl. (2) kann dabei durch das Materialgesetz im Transformator Kern:

$$B_E(t) = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H_E(t) \quad (3)$$

sowie dem Zusammenhang zwischen magnetischem Fluss und B-Feld (magnetischer Flussdichte) hergestellt werden:

$$\Phi(t) = A_E \cdot B_E(t), \quad (4)$$

wobei A_E der Querschnitt des Transformator Kerns ist. Aus Gln. (2), (3) und (4) ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen Magnetisierungsstrom $i_\mu(t)$ und magnetischen Fluss $\Phi(t)$:

$$i_\mu(t) = \frac{l_E}{A_E \cdot N_1 \cdot \mu_r \cdot \mu_0} \cdot \Phi(t). \quad (5)$$

Gemäß Gl. (5) sinkt der für einen gegebenen magnetischen Fluss benötigte Magnetisierungsstrom mit steigender Permeabilität μ_r des Transformator Kernmaterials. Löst man Gl. (5) nach $\Phi(t)$ auf und setzt das Ergebnis in Gl. (1a) bzw. Gl. (1b) ein so erhält man:

$$u_1(t) = \underbrace{\frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_E \cdot N_1^2}{l_E}}_{L_1} \cdot \frac{di_\mu}{dt} \quad (6a)$$

$$u_2(t) = \underbrace{\frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_E \cdot N_1 \cdot N_2}{l_E}}_{L_{21}=M} \cdot \frac{di_\mu}{dt}, \quad (6b)$$

wobei L_1 und $L_{21} = M$ als Selbstinduktivität der Primärwicklung bzw. Gegeninduktivität der Primär- und Sekundärwicklung bezeichnet werden. Gemäß Gl. (6) stellt die Induktivität ein Maß für die für eine gegebene zeitliche Stromänderung induzierte Spannung dar.

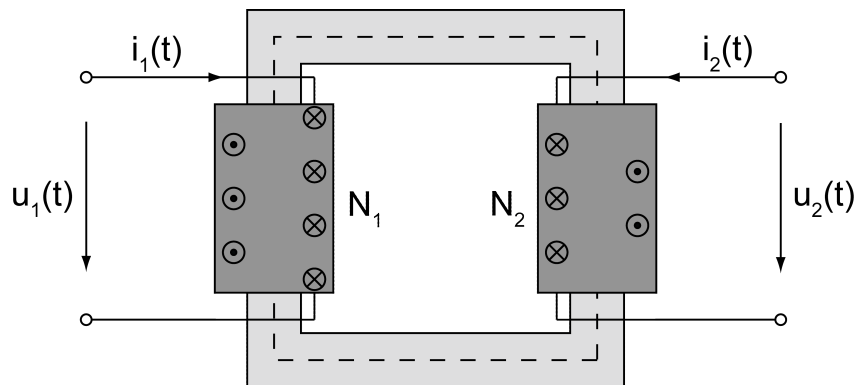


Abbildung 2: Illustration zum Klemmenverhalten des Transformators

Wird der Transformator sekundärseitig z.B. durch anschließen eines ohmschen Widerstandes belastet, fließt ein von null verschiedener sekundärseitiger Strom, der seinerseits eine Magnetisierung des Transformator Kerns bewirkt. Unter Annahme eines linearen Verhaltens des Transformators lässt sich die Auswirkung des sekundärseitigen Stroms durch einen zu Abb.1 analogen Aufbau, bei dem die Rollen der Primär- und Sekundärseite vertauscht werden, und anschließende Superposition der Ergebnisse ermitteln. Das

Klemmenverhalten gemäß Abb. 2 des verlustfreien, festgekoppelten Transformators, also des Transformators bei dem keinerlei Energie über ohmsche oder sonstige andere Verluste verloren geht und bei dem der gesamte Fluss, der die Primärwicklung durchfließt vollständig auch die Sekundärwicklung durchströmt, ergibt sich damit wie folgt:

$$u_1(t) = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (7a)$$

$$u_2(t) = M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}. \quad (7b)$$

Bei sinusförmigen Erregergrößen lässt sich Gl. (7) wie gewohnt mit Hilfe komplexer Ströme, Spannungen und Impedanzen in folgende Form überführen:

$$\underline{U}_1(\omega) = j\omega L_1 \cdot \underline{I}_1(\omega) + j\omega M \cdot \underline{I}_2(\omega) \quad (8a)$$

$$\underline{U}_2(\omega) = j\omega M \cdot \underline{I}_1(\omega) + j\omega L_2 \cdot \underline{I}_2(\omega). \quad (8b)$$

3 Transformator ESBS

3.1 Idealer Transformator

Dem idealen Transformator liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Der Transformator kern hat eine unendlich hohe magnetische Permeabilität.
- Der Transformator ist verlustlos.

Da sich bei unendlicher hoher Permeabilität des Kernmaterials außerhalb des Kerns keine Feldlinien ausbreiten können, folgt, dass beim idealen Transformator keine Streuflüsse auftreten und die primär- und sekundärseitigen Wicklungen demnach magnetisch festgekoppelt sind. Ferner hat gemäß der Diskussion in Abschnitt 2 die unendlich hohe Kernpermeabilität das Verschwinden des Magnetisierungsstromes i_μ zur Folge. Da außerdem laut Voraussetzung im idealen Transformator keine Verluste auftreten, beschreiben die beiden folgenden Gleichungen das Verhalten des idealen Transformators vollständig:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} = n \quad \frac{i_1}{i_2} = \pm \frac{N_2}{N_1} = \pm \frac{1}{n}, \quad (9)$$

wobei das Vorzeichen in der Strombeziehung vom relativen Wicklungssinn der beiden Wicklungen abhängt. Da zur Erhaltung des Spannungsgleichgewichts im primärseitigen Kreis der durch den Strom im Sekundärkreis hervorgerufene magnetische Fluss durch den primärseitigen Fluss kompensiert werden muss, gilt bei gleichgerichtetem Wicklungssinn das negative Vorzeichen und bei entgegengerichtetem Wicklungssinn das positive Vorzeichen. Aus Gl. (9) wird ersichtlich, dass das elektrische Verhalten des idealen Transformators einzig durch sein Übertragungsverhältnis n bestimmt ist. Das Schaltzeichen für den idealen Transformator ist in Abb. 3 dargestellt.

3.2 Nichtideale magnetische Kopplung

Bei nichtidealer magnetischer Kopplung zwischen primärseitiger und sekundärseitiger Wicklung existiert ein sogenannter Streufluss, also ein magnetischer Fluss, welcher zwar eine Transformatorspule aber nicht die jeweils andere durchsetzt, vgl. Abb. 4. Modelliert

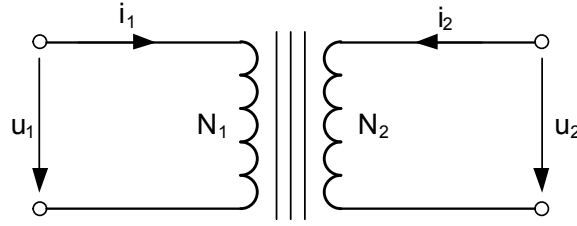


Abbildung 3: Ersatzschaltbild des idealen Übertragers.

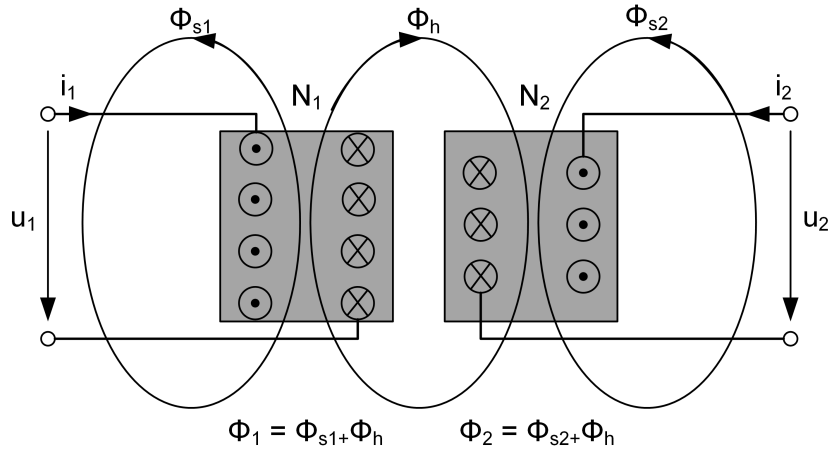


Abbildung 4: Illustration des Streufelds beim nicht festgekoppelten Transformator.

werden kann dieser Streufluss durch aufspalten der Induktivitäten L_1 und L_2 in jeweils eine Hauptinduktivität L_{h1} bzw. L_{h2} , welche dem Hauptfluss Φ_h entspricht sowie jeweils eine Streuinduktivität L_{s1} bzw. L_{s2} , welche die Streuflüsse Φ_{s1} und Φ_{s2} modellieren. Formal lassen sich die Induktivitäten L_1 , L_2 und M aus Gl. (7) somit folgendermaßen umschreiben:

$$L_1 = L_{s1} + L_{h11} = \sigma_1 \cdot L_1 + (1 - \sigma_1) L_1 = (1 - k_1) \cdot L_1 + k_1 L_1 \quad (10a)$$

$$L_2 = L_{s2} + L_{h22} = \sigma_2 \cdot L_2 + (1 - \sigma_2) L_2 = (1 - k_2) \cdot L_2 + k_2 L_2 \quad (10b)$$

$$M = L_{h12} = L_{h21}, \quad (10c)$$

wobei $\sigma_{1,2}$ und $k_{1,2}$ als partielle Streu- bzw. Koppelkoeffizienten bezeichnet werden. Aus Gl. (6) lässt sich dabei folgender Zusammenhang zwischen den Induktivitäten L_{h11} , L_{h22} sowie der Gegeninduktivität M ableiten:

$$N_2^2 L_{h11} = N_1^2 L_{h22} \quad (11a)$$

$$M = \frac{N_1}{N_2} L_{h22} = \frac{N_2}{N_1} L_{h11}. \quad (11b)$$

Die nichtideale magnetische Kopplung zwischen dem Primär- und Sekundärkreis des Transformators lässt sich alternativ durch den sogenannten Kopplungsgrad k bestimmen, der wie folgt definiert ist:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}, \quad (12)$$

wobei ein Kopplungsgrad von $k = 1$ einer festen magnetischen Kopplung entspricht (kein Streufluss) und ein Kopplungsgrad von $k = 0$ einer Situation mit zwei magnetisch vollständig entkoppelten Spulen (kein Hauptfluss und ausschließlich Streufluss) entspricht.

Aus Gl. (7) und den Größen aus Gl. (10) lässt sich unter Benutzung des in Abschnitt 3.1 eingeführten Ersatzschaltbildes des idealen Transformators das in Abb. 5 dargestellte Ersatzschaltbild ableiten.

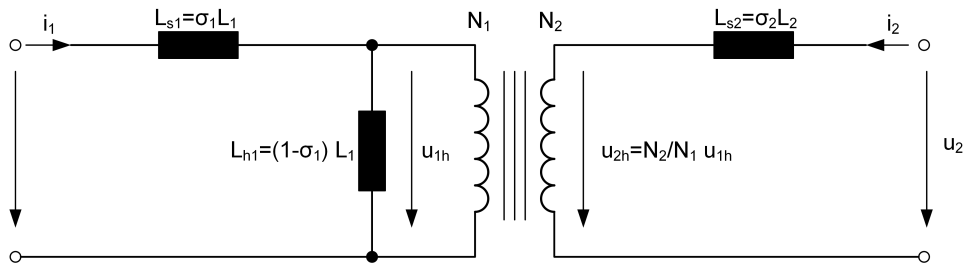


Abbildung 5: Ersatzschaltbild eines verlustlosen nicht festgekoppelten Transformators.

3.3 Transformatorverluste und nichtideale Kopplung

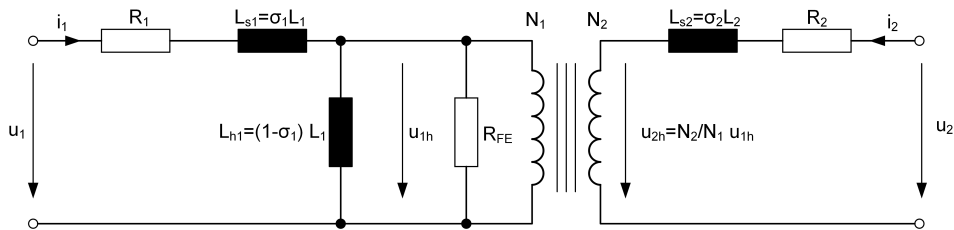


Abbildung 6: Ersatzschaltbild eines verlustbehafteten nicht festgekoppelten Transformators.

In einem realen Transformator treten neben den Streuverlusten, die allerdings keine echten Energieverluste darstellen, da die Energie reversibel im Streufeld gespeichert wird, auch tatsächliche Energieverluste in Form von ohmschen Verlusten in den Wicklungswiderständen sowie Verluste im Transformator Kern auf. Bei letzteren handelt es sich vor allem um Wirbelstromverluste, die durch die zeitlich veränderlichen magnetischen Flüsse im leitfähigen Transformator kern hervorgerufen werden sowie Hystereseverluste bei Verwendung eines Kernmaterials mit hysteretischer Magnetisierungskennlinie. Die Wirbelstromverluste können hierbei stark durch eine Blechung des Transformator kerns, wie sie auch bei den im Versuch verwendeten Transformatoren vorzufinden ist, verringert werden.

Da die Verluste im Eisenkern des Transformators in Phase mit der an der Hauptinduktivität abfallenden Spannung auftreten, können sie durch einen zusätzlichen Widerstand R_{FE} parallel zur Hauptinduktivität modelliert werden. Die ohmschen Verlustleistungen in den Transformatorwicklungen können durch Widerstände in Serie mit den Streuinduktivitäten in das Modell von Abb. 5 eingebaut werden. Insgesamt ergibt sich somit das in Abb. 6 dargestellte Ersatzschaltbild für den realen Transformator, welches sowohl das Streufeld als auch die Eisen- und Wicklungsverluste berücksichtigt.

4 Versuchsvorbereitung

4.1 Kopplungsgrad

Geben Sie die sich bei geeigneter Beschaltung aus Gl. (8) (Leerlauf und Kurzschluss im Lastkreis) ergebenden analytischen Ausdrücke für L_1 , L_2 und M an.

$$L_1 =$$

$$L_2 =$$

$$M =$$

4.2 Phasenschiebung unter Last

Bestimmen Sie für das in Abb. 7 dargestellte Transformatorersatzschaltbild einen analytischen Ausdruck für den komplexen Frequenzgang $H_{\text{trafo}}(\omega) = \underline{U}_2/\underline{U}_1(\omega)$. Skizzieren Sie den Verlauf von Betrag und Phase von $H_{\text{trafo}}(\omega)$. Wie vereinfacht sich dieser Ausdruck wenn der Transformator festgekoppelt ist?

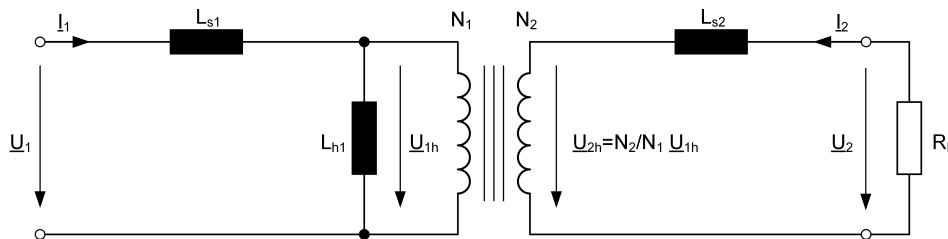


Abbildung 7: Transformatorersatzschaltbild mit Lastwiderstand zur Berechnung des Frequenzgangs $\underline{U}_2/\underline{U}_1(\omega)$.

$$H_{\text{trafo}}(\omega) =$$

$$H_{\text{trafo,simp}}(\omega) =$$

5 Versuchsdurchführung

5.1 Spannungsübersetzung beim unbelasteten Transformator

In diesem ersten Versuchsteil sollen verschiedene Übersetzungsverhältnisse des unbelasteten Transformators betrachtet werden. Bauen Sie dazu die Schaltung mit $R_V = 100 \Omega$ nach Abb. 8 auf. Erzeugen Sie ein Sinuseingangssignal U_{Ein} mit Hilfe des Signalgenerators des Oszilloskops, $f = 500 \text{ Hz}$, $U = 1 \text{ V}_{pp}$. (Die Bedienung des Oszilloskops erfolgt über die Software *VirtualBench* von *National Instruments*.)

Messen Sie jeweils für die verschiedenen Windungsverhältnisse gemäß Tabelle 1 die Primärspannung U_1 , die Sekundärspannung U_2 mit den beiden Kanälen des Oszilloskops und berechnen Sie das Verhältnis U_2/U_1 . Übernehmen Sie Tabelle 1 in Ihr Protokoll und ergänzen Sie die zu ermittelnden Größen. Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse.

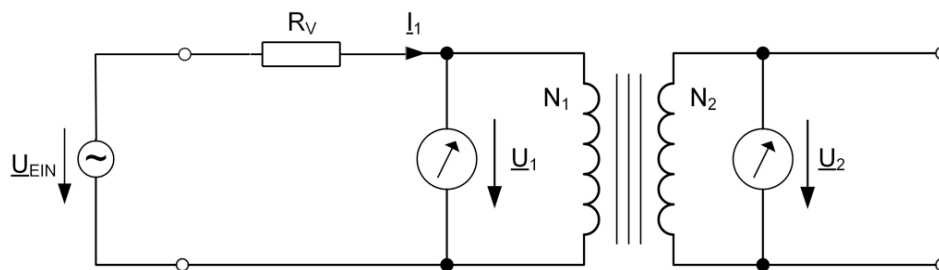


Abbildung 8: Versuchsaufbau des ersten Teilversuchs: unbelasteter Transformator

Tabelle 1: Messtabelle zu Versuch 5.1

N_1	N_2	U_1 [V]	U_2 [V]	U_2/U_1
250	500			
500	500			
1000	500			
1000	250			

5.2 Der belastete Transformator

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 Abb. 9 auf. Als Last R_L verwenden Sie ein Potentiometer ($0 \dots 1000\ \Omega$) dem Sie zusätzlich einen $100\ \Omega$ Widerstand in Reihe schalten. Als Eingangssignal U_{Ein} stellen Sie am Signalgenerator des Oszilloskops ein Sinussignal der Spannung $1\ V_{pp}$ 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 2 und berechnen Sie zudem das Verhältnis U_2/U_1 . Übernehmen Sie Tabelle 2 in ihr Protokoll und ergänzen Sie die zu ermittelnden Größen.

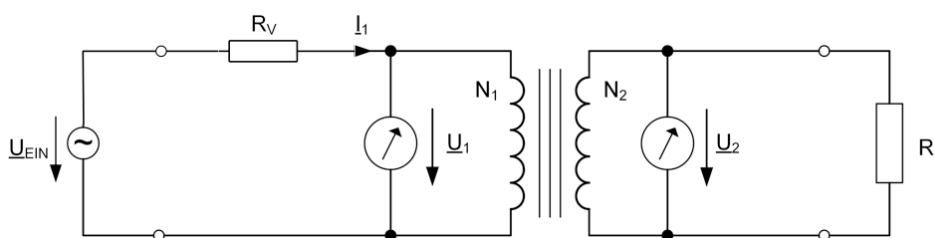


Abbildung 9: Versuchsaufbau des zweiten Teilversuchs: belasteter Transformator

Tabelle 2: Messtabelle zu Versuch 5.2

	R_L [Ω]	100	150	200	250	300	350	400	600	800	1000
500:500	U_1 [V]										
	U_2 [V]										
	U_2/U_1										
250:500	U_1 [V]										
	U_2 [V]										
	U_2/U_1										

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.

5.3 Kopplungsgrad

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 Abbildung 10 um die Größen U_1 und I_1 zu ermitteln. Als Eingangssignal erzeugen Sie wieder einen Sinus mit $U = 1 \text{ V}_{pp}$ mit Hilfe des Signalgenerators des Oszilloskops. ($R_V = 100 \Omega$)

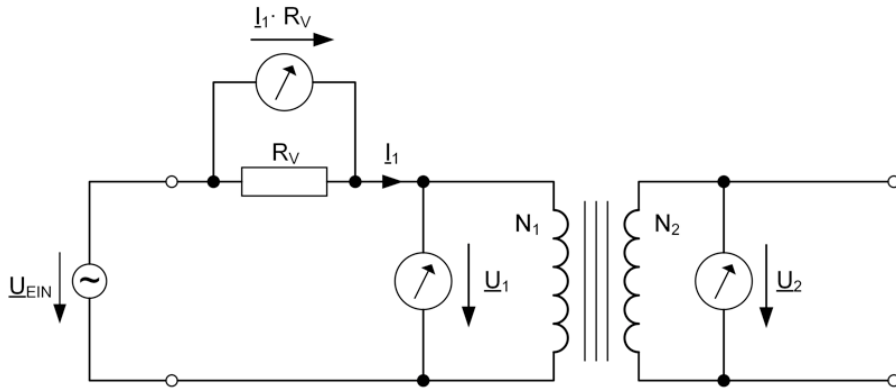


Abbildung 10: Aufbau zur Ermittlung des Kopplungsgrades

Für die Berechnung von L_2 muss der Primärstrom I_1 , sowie der Kurzschlussstrom I_2 ermittelt werden. Bauen Sie hierzu die Schaltung nach Abbildung 11 auf. Geben Sie hier einen Sinus der Spannung $U = 2 \text{ V}_{pp}$ auf die Schaltung und messen Sie die beiden Ströme I_1 und I_2 mit Hilfe der *Keysight* Hand-Multimeter (Messbereich mA) für die beiden Frequenzen f_1 und f_2 .

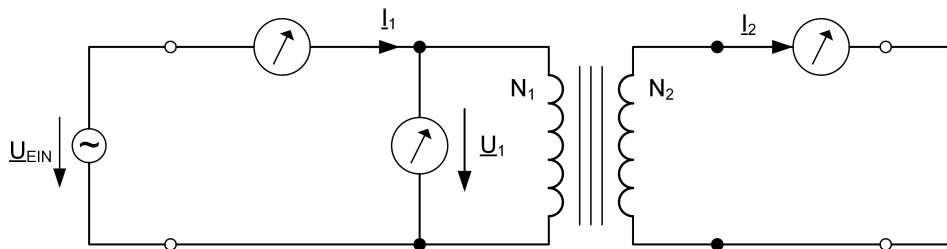


Abbildung 11: Versuchsaufbau für die Kurzschlussmessungen zur Bestimmung des Kopplungsgrades.

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.

5.4 Frequenzabhängiges Übertragungsverhalten

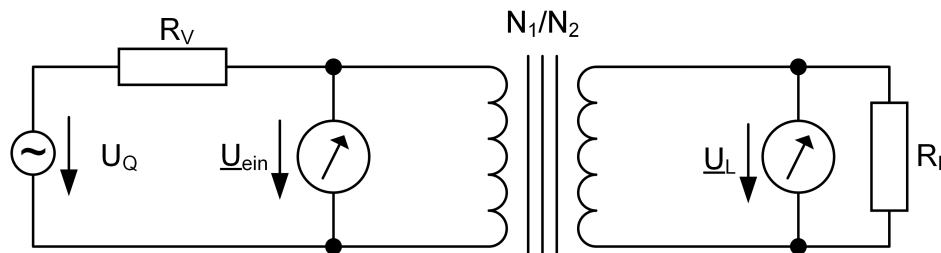


Abbildung 12: Versuchsaufbau zur Messung des Übertragungsverhalten bei verschiedenen Frequenzen.

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

Messen Sie hierzu mit dem in Abb. 12 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 $R_L = \{100 \Omega, 680 \Omega, 1 \text{ k}\Omega\}$. Verwenden Sie für die Messungen den *LabVIEW Bode Analyzer*.

Setzen Sie die Quellenspannung U_Q mit Hilfe der *LabVIEW* Software auf 1 V. Nehmen Sie den Betrag und die Phase des Frequenzgangs der Übertragungsfunktion $\underline{U}_2/\underline{U}_1(\omega)$ für Frequenzen zwischen 100 Hz und 100 kHz für die drei oben genannten Lastwiderstandswerte auf. Achten Sie dabei darauf, für die Messungen eine ausreichend hohe Anzahl an Messpunkten zu wählen. Tragen Sie anschließend Betrag und Phase von $\underline{U}_2/\underline{U}_1(\omega)$ für die drei Lastwiderstandswerte in einem Bode-Diagramm auf. Diskutieren Sie Ihre Messwerte mit Hilfe Ihrer Ergebnisse aus Abschnitt 4.2.