

# Versuch 25

## Der Transformator

Sascha Hankele  
sascha@hankele.com

Kathrin Alpert  
kathrin.alpert@uni-ulm.de

durchgeführt am 4. Mai 2007

(Korrigierte Version)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
1.1	Grundlegendes . . . . .	3
1.1.1	Maxwellgleichungen . . . . .	3
1.1.2	Regeln von Kirchhoff . . . . .	3
1.1.3	Weitere Gesetze . . . . .	4
1.2	Magnetische Eigenschaften der Materie . . . . .	4
1.2.1	Diamagnetismus . . . . .	4
1.2.2	Paramagnetismus . . . . .	5
1.2.3	Ferromagnetismus . . . . .	5
1.3	Gegeninduktivität . . . . .	6
1.4	Transformator . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Versuchsbeschreibung</b>	<b>9</b>
2.1	Bestimmung von Impedanzen . . . . .	9
2.2	Kopplungsgrad des Transformators . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Versuchsauswertung</b>	<b>10</b>
3.1	Verifizierung der Übersetzungsverhältnisse . . . . .	10
3.1.1	Leerlaufmessung . . . . .	10
3.1.2	Kurzschlussmessung . . . . .	12
3.2	Transformator unter Last . . . . .	13
3.3	Induktivitäten . . . . .	16
3.3.1	Frequenz 130 Hz . . . . .	16
3.3.2	Frequenz 320 Hz . . . . .	17
3.4	Kopplungsgrad . . . . .	17
3.4.1	Frequenz 130 Hz . . . . .	18
3.4.2	Frequenz 320 Hz . . . . .	18
3.5	Bestimmung der Ausgangsimpedanz bei maximaler Leistung . . . . .	19
3.6	Zusammenhang zwischen Spannungsübersetzungsverhältnis und Windungszahl	19
3.7	Fehlerbetrachtung . . . . .	20

# 1 Theoretische Grundlagen

## 1.1 Grundlegendes

### 1.1.1 Maxwellgleichungen

- Gauss'sches Gesetz

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_{\text{el}} \quad (1)$$

Die Quellen des elektrischen Feldes sind Ladungen.

- Faradaysches Induktionsgesetz

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

Zeitlich veränderliche Magnetfelder erzeugen elektrische Felder.

- Quellenfreiheit des Magnetfeldes

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (3)$$

Es gibt nur geschlossene Magnetfeldlinien, es existieren keine magnetischen Monopole (was allerdings nicht sicher ist)

- Verallgemeinertes Durchflutungsgesetz

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{i} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4)$$

Ströme oder zeitlich veränderliche elektrische Felder erzeugen Magnetfelder.

### 1.1.2 Regeln von Kirchhoff

- Verzweigen sich mehrere Leiter in einem Punkte P, so muss die Summe der einlaufenden Ströme gleich der Summe der auslaufenden Ströme sein:

$$\sum_k I_k = 0 \quad (5)$$

- In jedem geschlossenem Stromkreis ist die Summe aller Verbraucherspannungen gleich der Generatorspannung:

$$\sum_k U_k = \sum_l U_{\text{ind},l} \quad (6)$$

### 1.1.3 Weitere Gesetze

- Regel von Lenz: Der induzierte Strom wirkt seiner Ursache entgegen.

- Magnetischer Fluss

$$\Phi = BA \quad (7)$$

- Induktionsgesetz

$$U_{ind} = -N\dot{\Phi} \quad (8)$$

- Wechselstromwiderstände

Die Impedanzen von Spule L und Kondensator C sind:

$$Z := \frac{U}{I} \quad (9)$$

$$Z_C = \frac{1}{i\omega C} \quad (10)$$

$$Z_L = i\omega L \quad (11)$$

- Elektromagnetische Kraft

$$\vec{F}_{el} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \quad (12)$$

- Ohmsches Gesetz

$$U = RI \quad (13)$$

## 1.2 Magnetische Eigenschaften der Materie

Zur Unterteilung der Materie in verschiedene Klassen bzgl. ihrer magnetischen Eigenschaften dient eine Funktion  $\vec{B}(\vec{H})$ . Diamagnetika, Paramagnetika und Ferromagnetika stellen dabei die wichtigsten Klassen dar, wobei allgemein gilt:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} = (1 + \chi_m)\mu_0\vec{H} \quad (14)$$

$\chi_m$  heißt magnetische Suszeptibilität.

### 1.2.1 Diamagnetismus

Für  $\chi_m < 0$  heißen Substanzen diamagnetisch.

Wird eine Probe einer diamagnetischen Substanz in ein inhomogenes Magnetfeld gebracht, so wird diese aus dem Feld herausgedrängt.

Der Grund hierfür sind induzierte Wirbelströme, die durch die Rotation der Atome zustande kommen. Dabei werden magnetische Momente erzeugt, die dem anliegenden Magnetfeld entgegengerichtet sind (Regel von Lenz). Daher ergibt sich eine negative Suszeptibilität.

Der Diamagnetismus ist temperaturabhängig. Insgesamt ist die Stärke sehr gering:  $|\chi_m| \approx 10^{-5}$ . Edelgase und Alkalikationen sind z.B. diamagnetisch.

### 1.2.2 Paramagnetismus

Paramagnetisches Verhalten findet man bei Substanzen mit ungepaarten Elektronen, die permanente magnetische Momente erzeugen. Solche Stoffe werden in ein inhomogenes Magnetfeld hineingezogen.

So lange kein äußeres Magnetfeld anliegt, sind die Momente statistisch verteilt und heben sich gegenseitig auf. Erst durch Anlegen eines äußeren Feldes richten sich die Momente aus und verstärken das Feld.  $\chi_m$  ist also positiv.

Bei steigender Temperatur bewegen sich die Teilchen immer stärker, was den Paramagnetismus abschwächt. Das Gesetz von Curie beschreibt die Temperaturabhängigkeit des Paramagnetismus:

$$\chi_m = \frac{const}{T} \quad (15)$$

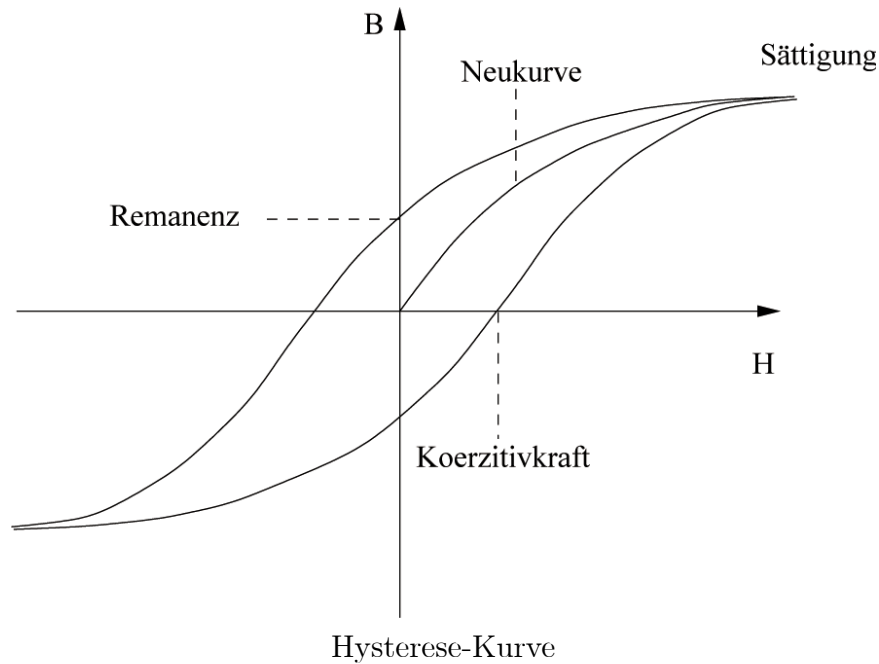
Flüssiger Sauerstoff und viele Metalle sind paramagnetisch

### 1.2.3 Ferromagnetismus

Beim Diamagnetismus und Paramagnetismus treten die magnetischen Momente nicht in Wechselwirkung. Treten in Feststoffen Wechselwirkungen zwischen den Spins paramagnetischer Teilchen auf, so spricht man von kooperativem Magnetismus. Unterhalb einer stoffabhängigen Temperatur, der Curie-Temperatur, erfolgt eine spontane Magnetisierung. Diese wird durch Spin-Spin Wechselwirkungen hervorgerufen.

Unterhalb dieser Curie-Temperatur spricht man von ferromagnetischem Verhalten. Die Kopplung der Spins benachbarter Teilchen ist auf kleine Bezirke begrenzt, die sog. Weisschen Bezirke. Diese Bezirke richten sich durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes jeweils schlagartig aus. Vorher ist der Stoff magnetisch neutral, da auch die Ausrichtung der Bezirke statistisch verteilt ist. Bei ferromagnetischen Stoffen ist die magnetische Suszeptibilität um bis zu  $10^{10}$  mal größer als bei paramagnetischen Stoffen.

Wird ein äußeres  $\vec{H}$ -Feld angelegt, dessen Stärke langsam erhöht wird, so richten sich die Weisschen Bezirke nach und nach aus, was die Magnetisierung verstärkt. Es entsteht eine Hysteresekurve.



Mit Erhöhung des äußeren Feldes steigt die Magnetisierung des Stoffes an, bis ein Sättigungswert erreicht ist. Wird das äußere Feld abgeschaltet, so bleibt der Stoff magnetisch (Remanenz). Verringert man das äußere Feld weiter und schaltet es danach wieder ab, so erhält man eine Hystereseschleife.

Will man die Probe wieder entmagnetisieren, so kann man ein hochfrequentes  $\vec{H}$ -Feld anlegen, dessen Amplitude man langsam zurückdreht. Oberhalb der Curie-Temperatur geht die Magnetisierung auch verloren.

Die von der Hysteresekurve umschlossene Fläche entspricht gerade der Verlustenergie:

$$E = \frac{1}{2} \oint \vec{B} d\vec{H} \quad (16)$$

Ferromagnetismus tritt z.B. bei Eisen, Nickel und Cobalt auf.

### 1.3 Gegeninduktivität

Jeder Strom bildet ein Magnetfeld aus, welches in einem anderen Leiter eine Spannung induziert. So induziert auch beim Transformator die Sekundärspule in der Primärspule eine Spannung. Der zusätzlich Fluss in den Spulen ist:

$$\Phi_{B1} = N_1 B_2 A = L_{21} I_2$$

$$\Phi_{B2} = N_2 B_1 A = L_{12} I_1$$

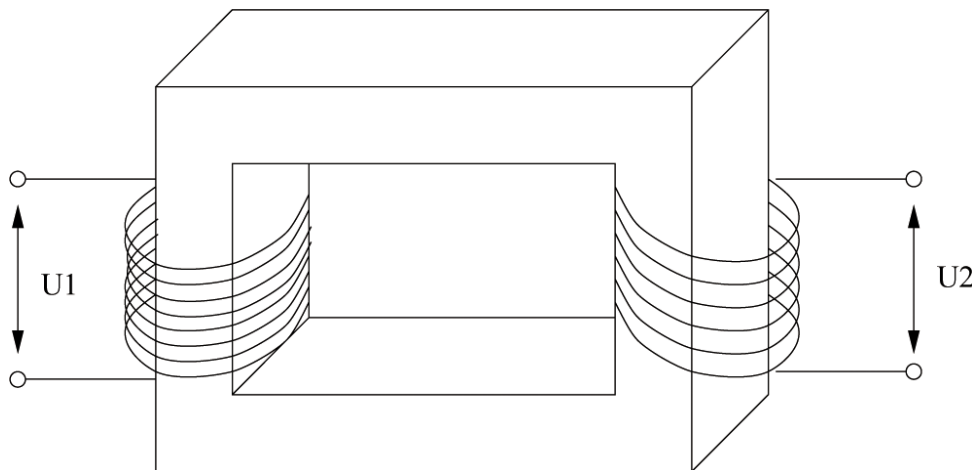
Das Magnetfeld einer langen Spule ist  $B_i = \mu\mu_0 \frac{N_i}{l} I_i$ , womit für die Gegeninduktivitäten gilt:

$$L_{12} = L_{21} = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} A$$

Über das Gesetz von Biot-Savart lässt sich die Gegeninduktivität herleiten:

$$L_{12} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \iint_{s_1 s_2} \frac{ds_1 ds_2}{r_{12}}$$

## 1.4 Transformator



Transformator

Ein Transformator wandelt hohe Spannungen in niedrige Spannungen um und umgekehrt. Er besteht aus zwei Spulen, der Primär- und der Sekundärspule, welche beide vom gleichen magnetischen Fluss durchsetzt werden. An der Primärspule liegt die zu transformierende Spannung an, wohingegen an der Sekundärspule die Spannung abgegriffen wird. Reale Transformatoren haben im Gegensatz zu idealen Transformatoren Leistungsverluste. Bei guten Geräten liegt der Wirkungsgrad über 95%.

Die beiden Spulen des Transformators sind über einen Metallkern gekoppelt. Wird an die Primärspule eine Wechselspannung  $U_1$  angelegt, so baut sich ein magnetisches Feld  $\vec{H}$  und damit das  $\vec{B}$ -Feld  $\vec{B} = \mu\mu_0 \frac{N^2 A}{l}$  auf. Im Idealfall durchsetzt der daraus resultierende magnetische Fluss Primär- und Sekundärspule des Transformators gleichermaßen, so dass gilt:  $\Phi_1 = \Phi_2$ . Dies wäre der Fall wenn das Magnetfeld innerhalb des Metallkerns bliebe und es keine Abschwächung des Felds durch Wirbelströme gäbe. Eine hohe Permeabilität ist hier also von Nutzen. Durch voneinander isolierte Trafobleche lassen sich auch Wirbelströme vermeiden.

Die Sekundärspannung  $U_2$  wird durch die Änderung des Flusses induziert. Aus diesem Grund funktioniert ein Transformator auch nur bei Wechselspannung.

Ein Aufbau wie in obiger Abbildung ist nur zur Veranschaulichung sinnvoll, da auf Grund der Kanten und der Form kein hoher Wirkungsgrad zu erwarten ist. Sinnvoller sind Ringkerntransformatoren, bei denen beide Spulen übereinander auf einen Torus gewickelt sind. Streufelder werden dadurch sehr gut vermieden.

Für den idealen Transformator gilt:  $P_1 = P_2$ , d.h. Leistungserhaltung. Insgesamt können am Transformator, je nach Übersetzungsverhältnis, beliebige Spannungen und Stromstärken realisiert werden.

Mit Hilfe der Maschenregel und unter Berücksichtigung der Selbstinduktivität ( $N_1 A \dot{B}_2 = N_1 A \mu_0 \mu_r \frac{N_2}{l} \dot{I}_2 = \mu_0 \mu_r A \frac{N_1 N_2}{l} \dot{I}_2 = L_{12} \dot{I}_2$ ) erhält man:

$$U_1 = R_1 I_1 - U_{\text{ind},1} = R_1 I_1 + N_1 A (\dot{B}_1 + \dot{B}_2) = R_1 I_1 + L_1 \dot{I}_1 + L_{12} \dot{I}_2 \quad (17)$$

Analog erhält man die Sekundärspannung. Mit Wechselstrom  $I(t) = I_0 e^{i\omega t}$  ergibt sich  $\dot{I}(t) = i\omega I(t)$ . Damit erhält man für die beiden Spannungen:

$$U_1 = (R_1 + i\omega L_1) I_1 + i\omega L_{12} I_2 \quad (18)$$

$$U_2 = i\omega L_{12} I_1 + (R_2 + i\omega L_2) I_2 \quad (19)$$

Unter Annahme eines idealen, unbelasteten Transformators folgt mit dem Induktionsgesetz:

$$U_1 = -U_{\text{ind},1} = -(-N_1 \dot{\Phi}) \quad (20)$$

$$U_2 = -N_2 \dot{\Phi} = -N_2 \frac{U_1}{N_1} \quad (21)$$

Dividiert man beide Gleichungen, so erhält man das Übersetzungsverhältnis:

$$\frac{U_1}{U_2} = -\frac{N_1}{N_2} \quad (22)$$

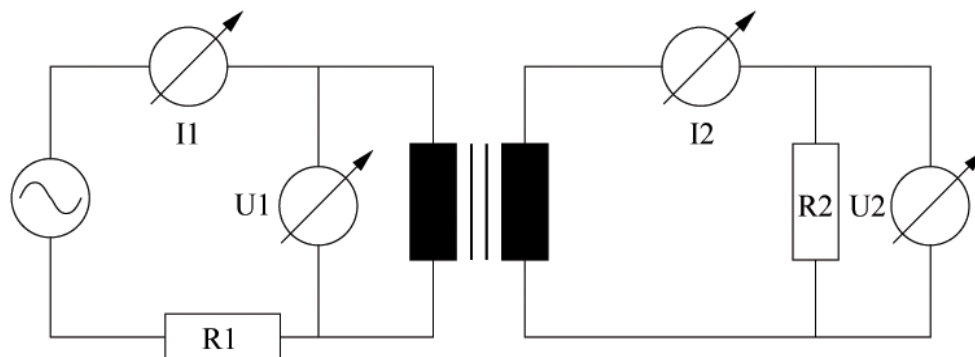
Bei der Transformation beträgt die Phasenverschiebung der Spannung  $\pi$ , was das Minuszeichen angibt. Außerdem erhält man:

$$\frac{I_1}{I_2} = -\frac{N_2}{N_1} \quad (23)$$

Ein Gleichspannungsanteil wird - wie oben erwähnt - nicht mittransformiert. Auf der Sekundärseite erhält man also eine Wechselspannung.



## 2 Versuchsbeschreibung



Schaltplan des Versuchsaufbaus

### 2.1 Bestimmung von Impedanzen

Ein Transformator mit Primärwindungszahl  $N_1 = 50$  und veränderlicher Sekundärwindungszahl  $N_2$  wurde mit unterschiedlichen Widerständen  $R_2$  betrieben. Bei  $R_{21} = 10\Omega$ ,  $R_{22} = 100\Omega$ ,  $R_{23} = 0\Omega$  und  $R_{24} = \infty$  wurden Strom und Spannung auf Primär- und Sekundärseite gemessen. Auf der Sekundärseite erübrigt sich allerdings in einigen Fällen die Strom- bzw Spannungsmessung, da der Widerstand  $R_2$  bekannt ist.

Aus Gl. 18 und Gl. 19 erhält man für den Leerlauf ( $I_2 = 0$ ):

$$U_1 = (R_1 + i\omega L_1)I_1$$

$$U_2 = i\omega L_{12}I_1$$

und für den Kurzschluss ( $U_2 = 0$ ):

$$U_1 = (R_1 + i\omega L_1)I_1 + i\omega L_{12}I_2$$

$$0 = i\omega L_{12}I_1 + (R_2 + i\omega L_2)I_2$$

Bei einer idealen Spule ist  $R_1 = 0$ . Nach kurzer Umformung erhält man für die Impedanzbeträge

im Leerlauf:

$$L_1 = \frac{U_1}{\omega I_1} \quad (24)$$

$$L_{12} = \frac{U_2}{\omega I_1} \quad (25)$$

beim Kurzschluss:

$$U_1 = i\omega L_1 I_1 + i\omega L_{12} I_2 \quad (26)$$

$$L_{12} = L_2 \frac{I_2}{I_1} \quad (27)$$

## 2.2 Kopplungsgrad des Transformators

Der Kopplungsgrad ist definiert als:

$$\kappa = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

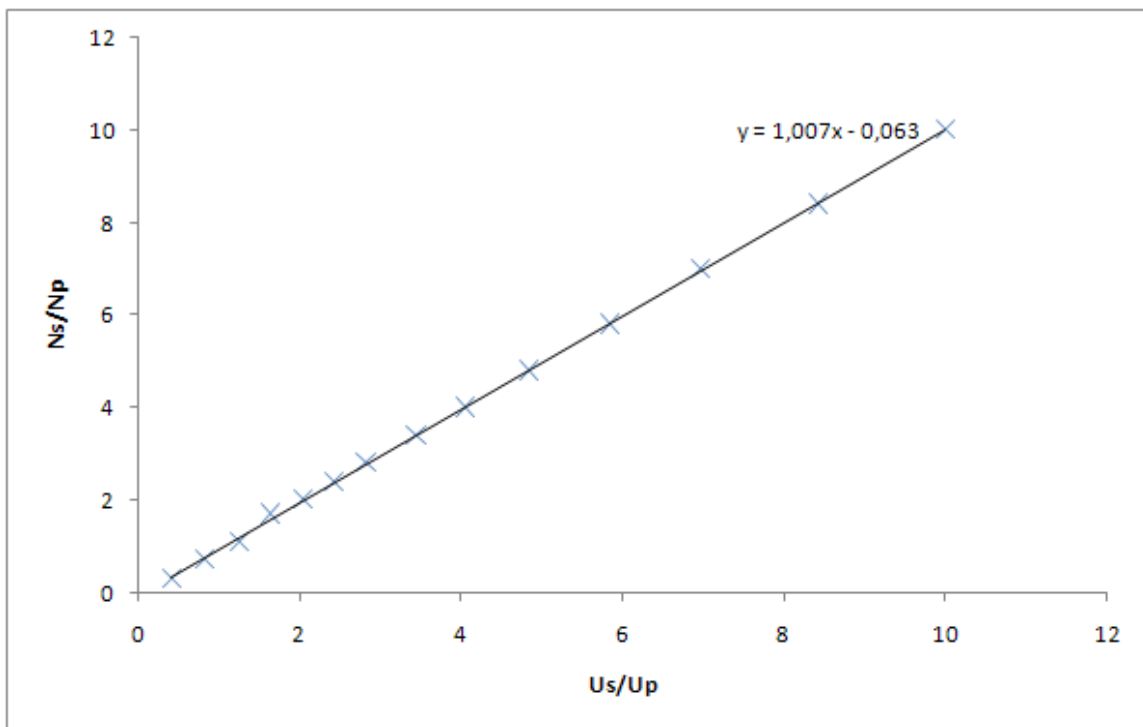
## 3 Versuchsauswertung

Der Versuch wurde bei den Frequenzen  $\nu_1 = 130\text{Hz}$  und  $\nu_1 = 320\text{Hz}$  durchgeführt. Die Tabellen befinden sich im Anhang.

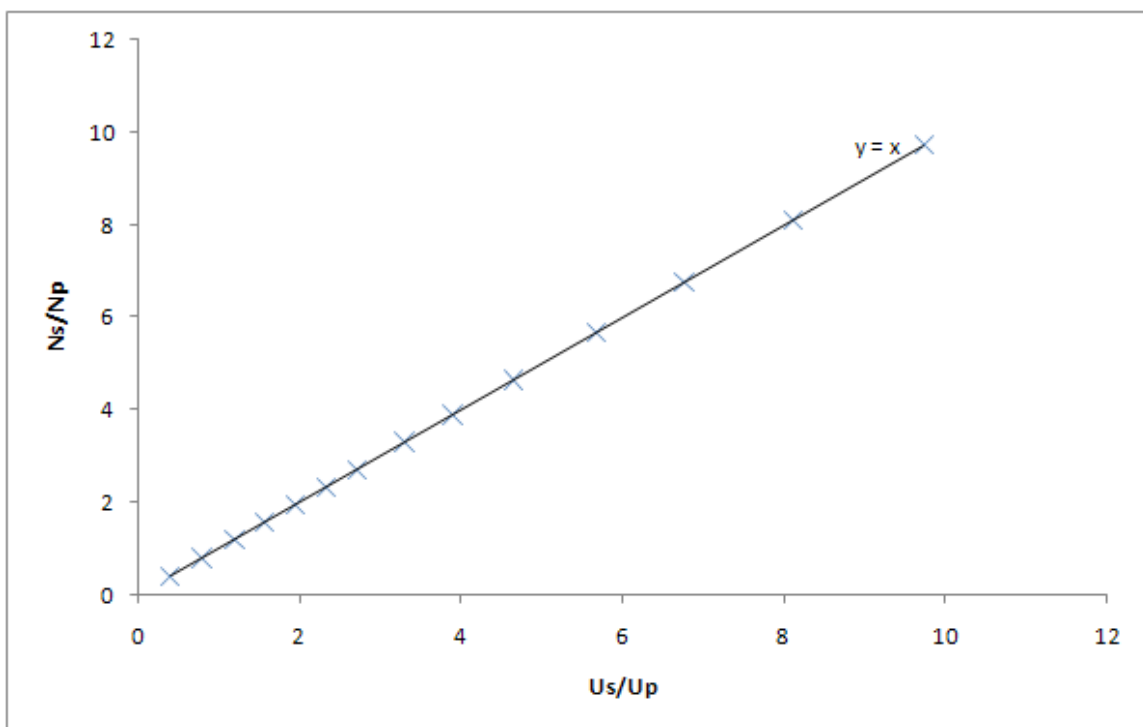
### 3.1 Verifizierung der Übersetzungsverhältnisse

#### 3.1.1 Leerlaufmessung

Bei der Leerlaufmessung wurden die Übersetzungsverhältnisse von  $\frac{n_s}{n_p}$  zu  $\frac{U_s}{U_p}$  überprüft. Laut Theorie sollte eine Ursprungsgerade entstehen. Die von Excel durchgeführte lineare Regression ist im Diagramm mit angegeben.



Übersetzungsverhältnis Leerlaufmessung 130Hz



Übersetzungsverhältnis Leerlaufmessung 320Hz

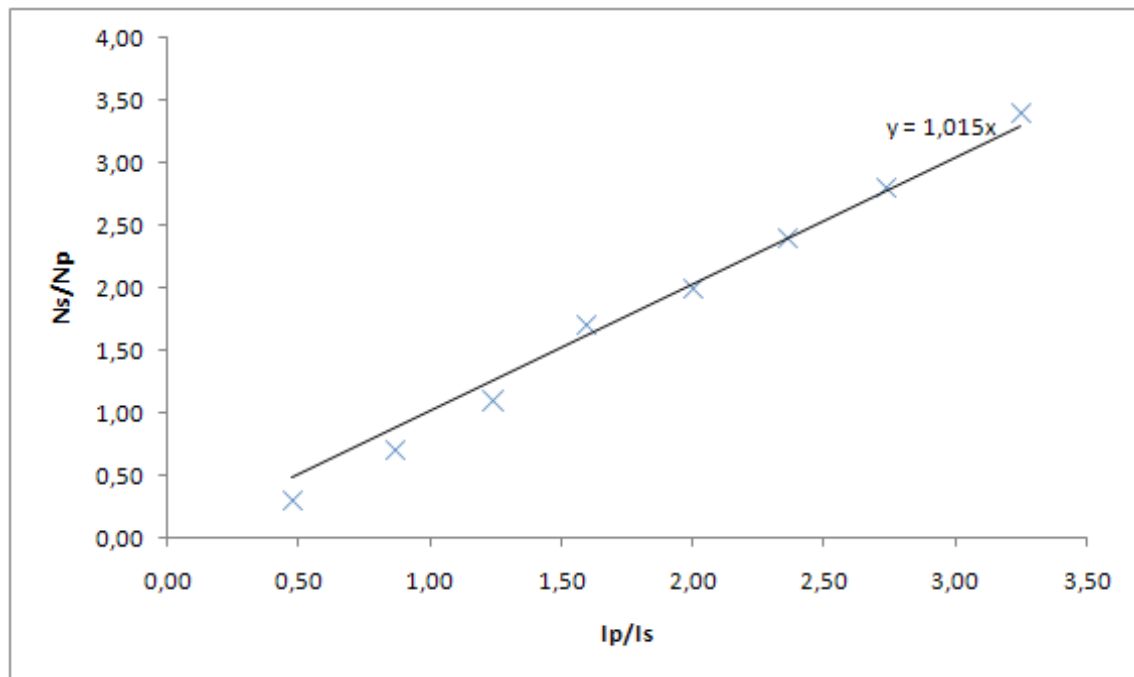
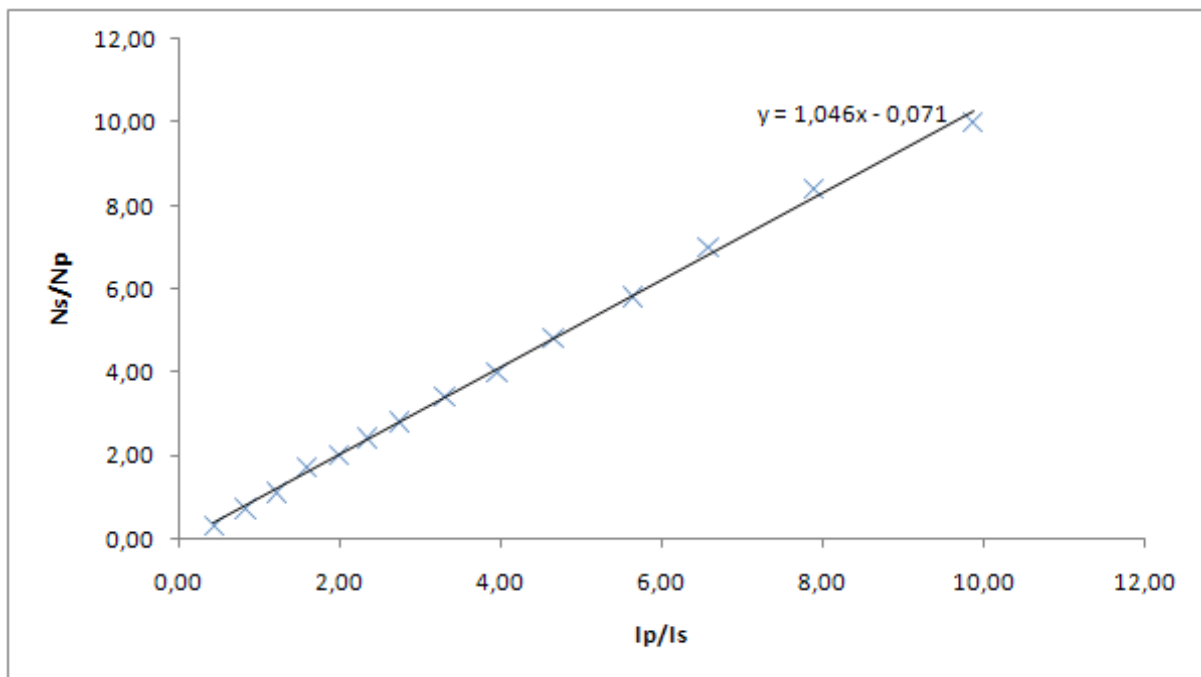


Abbildung 1: Übersetzungsverhältnis Kurzschlussmessung 130Hz

Die Ergebnisse der Leerlaufmessung sind zufriedenstellend. Die Regression bei 320Hz liefert eine Ursprungsgerade und stimmt so sehr gut mit der Theorie überein (Anm: Excel rechnet hier mit drei Nachkommastellen).

### 3.1.2 Kurzschlussmessung

Bei der Leerlaufmessung wurden die Übersetzungsverhältnisse von  $\frac{n_s}{n_p}$  zu  $\frac{I_p}{I_s}$  überprüft. Laut Theorie sollte eine winkelhalbierende Ursprungsgerade entstehen. Die von Excel durchgeführte lineare Regression ist im Diagramm mit angegeben.

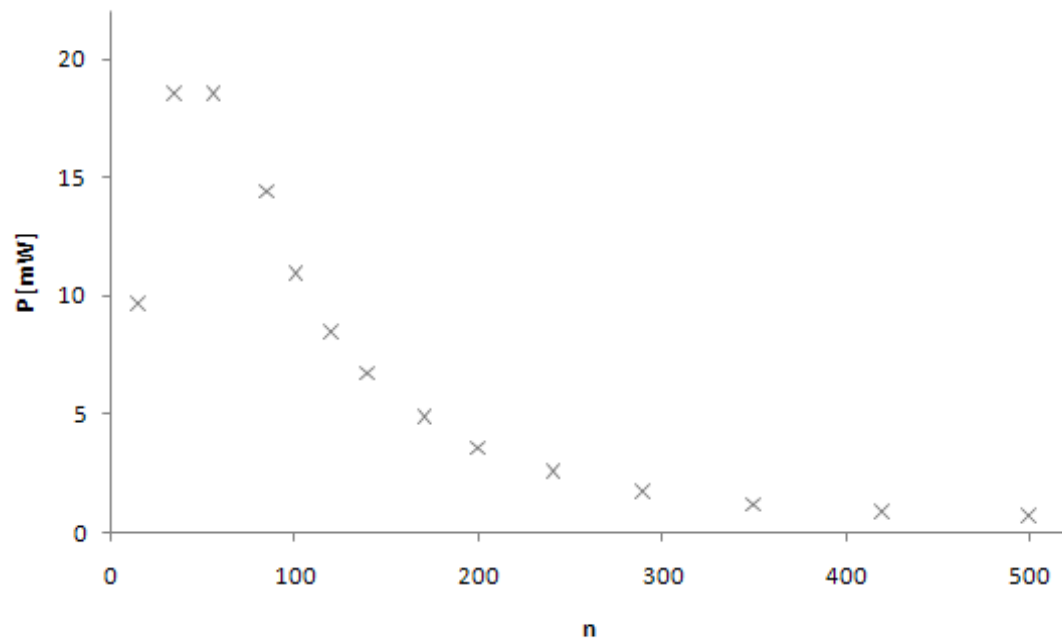


Übersetzungsverhältnis Kurzschlussmessung 320Hz

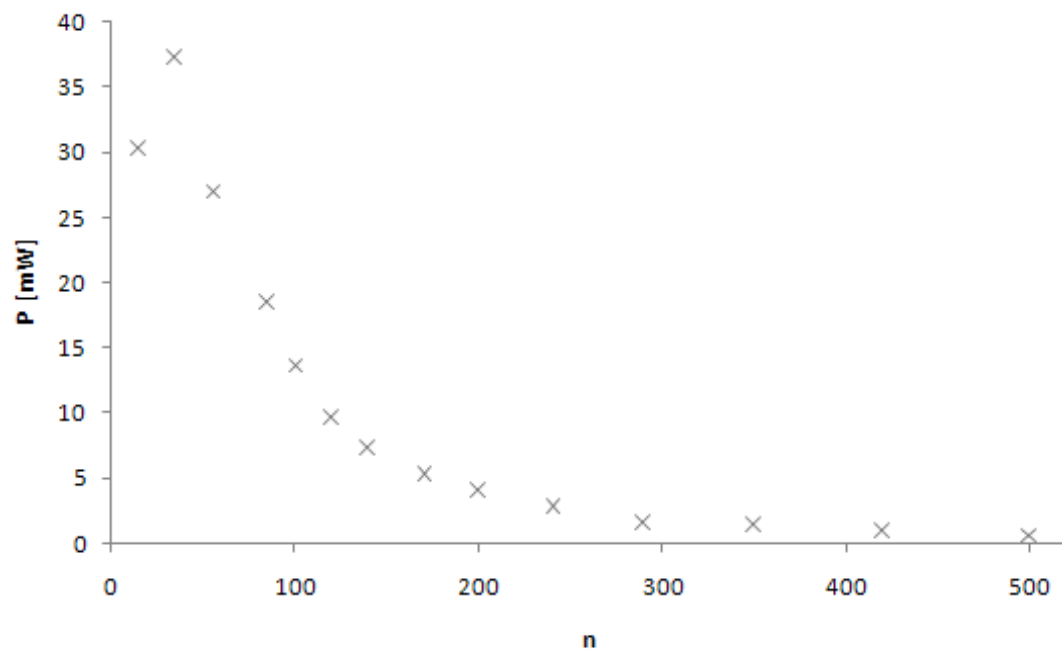
Auch hier ergeben die Messwerte annähernd eine winkelhalbierende Ursprungsgerade. Allerdings liegen bei der Messung mit 130Hz die ersten drei Werte etwas unterhalb der Geraden. Die Ursache könnte die Messbereichumschaltung sein.

### 3.2 Transformator unter Last

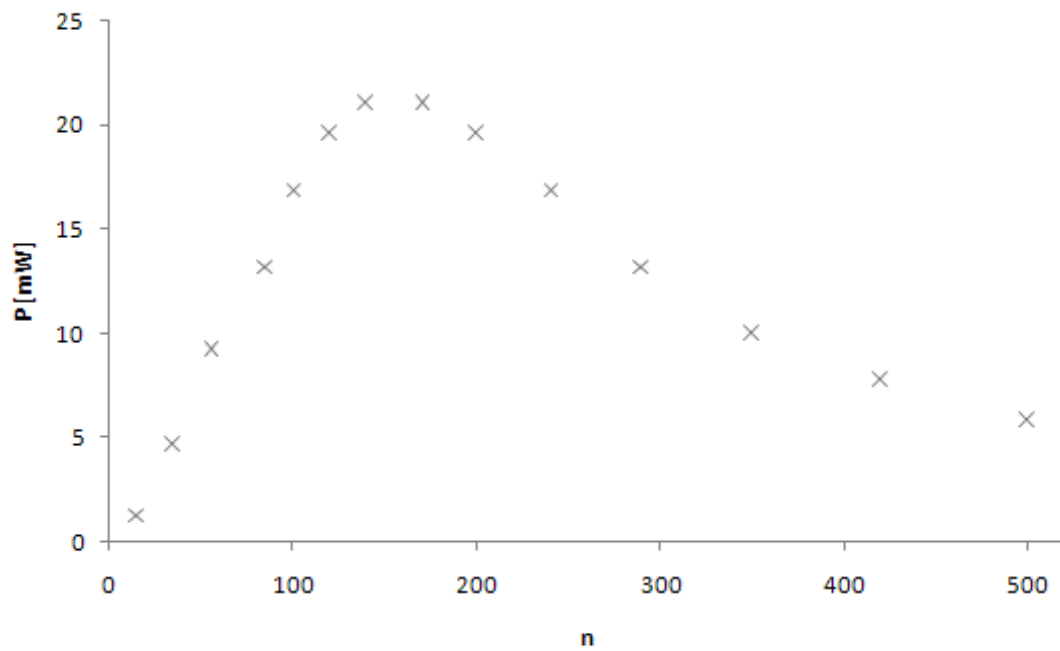
Bringt man in den Sekundärkreis bei beiden Frequenzen jeweils Widerstände  $R_1 = 10\Omega$  und  $R_2 = 100\Omega$ , so ergeben sich für das Verhältnis von Leistung zu Windungszahl folgende Kurven:



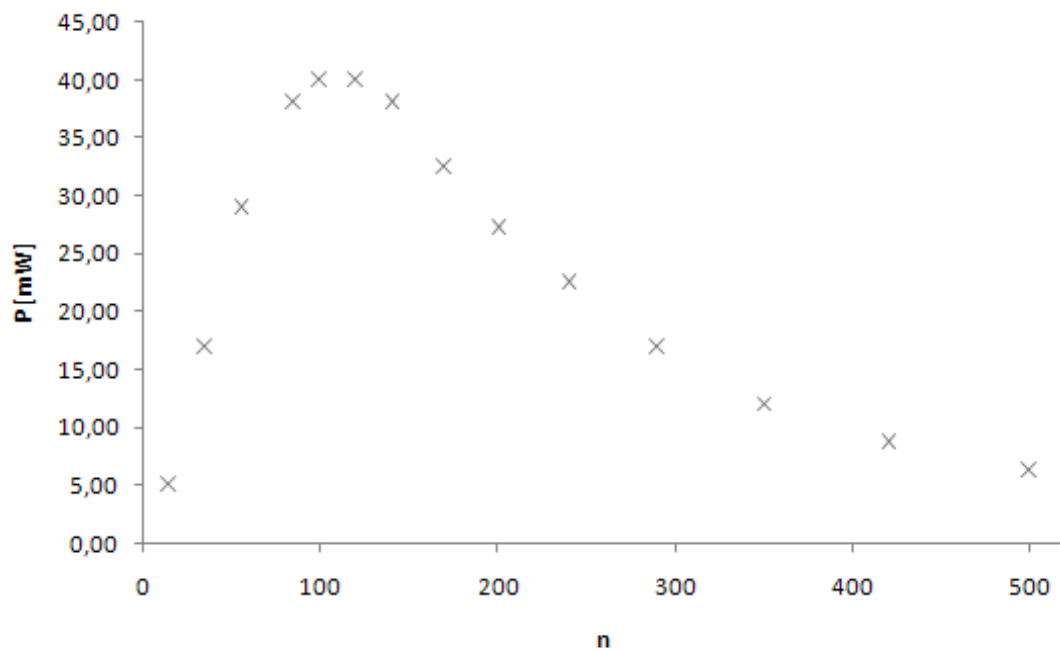
Widerstand 10 Ohm bei 130 Hz



Widerstand 10 Ohm bei 320 Hz



Widerstand 100 Ohm bei 130 Hz



Widerstand 100 Ohm bei 320 Hz

Man sieht, dass die Kurve ein Maximum besitzt. Bei kleinerem Widerstand und größer werdender Frequenz verschiebt sich dieses Maximum in Richtung kleinerer Windungszahlen.

### 3.3 Induktivitäten

Zur späteren Bestimmung des Kopplungsgrades werden die Induktivitäten benötigt. Bestimmt werden die Eigeninduktivitäten der beiden Spulen  $L_1$  und  $L_2$  sowie die gegenseitige Induktivität  $L_{12}$  mit den im Theorieteil hergeleiteten Formeln. Die Tabellen befinden sich im Anhang 5-8 (Anm: Im Anhang gilt:  $L_1 = L_p$ ;  $L_2 = L_s$ ;  $L_{12} = L_{ps}$ ).

Aus der Leerlaufmessung lässt sich  $L_1$  und  $L_{12}$  bestimmen. Aus der Kurzschlussmessung erhält man  $L_2$ .

#### 3.3.1 Frequenz 130 Hz

$L_1[H]$	$\Delta L_1[H \cdot 10^{-7}]$	$L_{12}[H]$	$\Delta L_{12}[H \cdot 10^{-7}]$	$L_2[H]$	$\Delta L_2[H \cdot 10^{-3}]$	$n_s$
0,01472	2,59	0,005956	1,840	0,00282	0,0412	15
0,01472	2,59	0,011912	2,308	0,01032	0,175	35
0,01472	2,59	0,018199	2,964	0,02253	0,459	55
0,01472	2,59	0,023989	3,640	0,03818	0,920	85
0,01472	2,59	0,02978	4,351	0,05955	1,707	100
0,01472	2,59	0,03557	5,084	0,08407	2,766	120
0,01472	2,59	0,04136	5,829	0,1131	4,229	140
0,01472	2,59	0,05046	7,016	0,1639	7,149	170
0,01472	2,59	0,05955	8,216	0,2322	11,989	200
0,01472	2,59	0,07114	9,755	0,3083	17,576	240
0,01472	2,59	0,08603	1,174	0,4793	34,783	290
0,01472	2,59	0,10257	1,396	0,7273	66,776	350
0,01472	2,59	0,12408	1,685	0,9678	97,576	420
0,01472	2,59	0,14724	1,997	1,4356	180,394	500

Die Fehler wurden per Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnet.



**3.3.2 Frequenz 320 Hz**

$L_1[H]$	$\Delta L_1[H \cdot 10^{-7}]$	$L_{12}[H]$	$\Delta L_{12}[H \cdot 10^{-7}]$	$L_2[H]$	$\Delta L_2[H \cdot 10^{-3}]$	$n_s$
0,01314	2,01	0,00519	1,027	0,00222	0,0313	15
0,01314	2,01	0,01030	0,634	0,00835	0,1396	35
0,01314	2,01	0,01563	2,343	0,01871	0,3694	55
0,01314	2,01	0,02061	3,028	0,03256	0,7706	85
0,01314	2,01	0,02558	3,723	0,05052	1,4156	100
0,01314	2,01	0,03055	4,422	0,07099	2,2731	120
0,01314	2,01	0,03553	5,125	0,09678	3,5549	140
0,01314	2,01	0,04334	6,232	0,14266	6,2126	170
0,01314	2,01	0,05116	7,343	0,20207	10,422	200
0,01314	2,01	0,06110	8,758	0,28395	17,086	240
0,01314	2,01	0,07460	1,068	0,42098	30,538	290
0,01314	2,01	0,08881	1,271	0,58469	49,283	350
0,01314	2,01	0,10658	1,524	0,84196	84,868	420
0,01314	2,01	0,12789	1,828	1,26294	158,675	500

Die Fehler wurden per Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnet.

**3.4 Kopplungsgrad**

Mit Hilfer der oben bestimmten Induktivitäten lässt sich der Kopplungsgrad wie im Theorieteil hergeleitet berechnen.

## 3.4.1 Frequenz 130 Hz

$n_s$	$\kappa$	$\Delta\kappa$
15	0,923	0,007
35	0,966	0,008
55	0,999	0,010
85	1,012	0,012
100	1,006	0,014
120	1,011	0,017
140	1,013	0,019
170	1,027	0,022
200	1,018	0,026
240	1,056	0,030
290	1,024	0,037
350	0,991	0,045
420	1,039	0,052
500	1,013	0,064

Das Ergebnis liegt im Bereich des erwarteten Fehlers, welcher per Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnet wurde.

## 3.4.2 Frequenz 320 Hz

$n_s$	$\kappa$	$\Delta\kappa$
15	0,960	0,007
35	0,983	0,008
55	0,997	0,010
85	0,996	0,012
100	0,993	0,014
120	1,000	0,016
140	0,996	0,018
170	1,001	0,022
200	0,993	0,026
240	1,000	0,030
290	1,003	0,036
350	1,013	0,043
420	1,013	0,051
500	0,993	0,062

Das Ergebnis liegt im Bereich des erwarteten Fehlers, welcher per Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnet wurde.

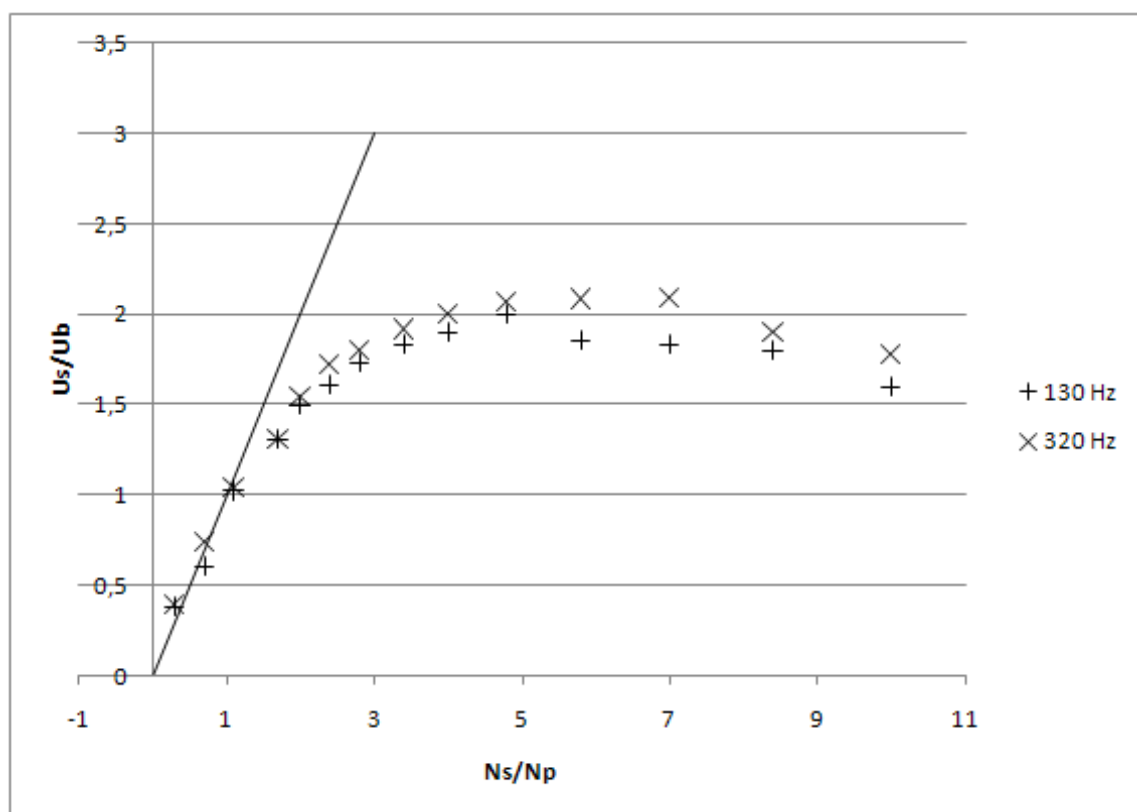
### 3.5 Bestimmung der Ausgangsimpedanz bei maximaler Leistung

Die Ausgangsimpedanz berechnet sich mit  $|Z| = R^2 + (\omega L)^2$ , wobei der Fehler per Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnet wurde. Bei maximaler Leistung erhält man folgende Impedanzen:

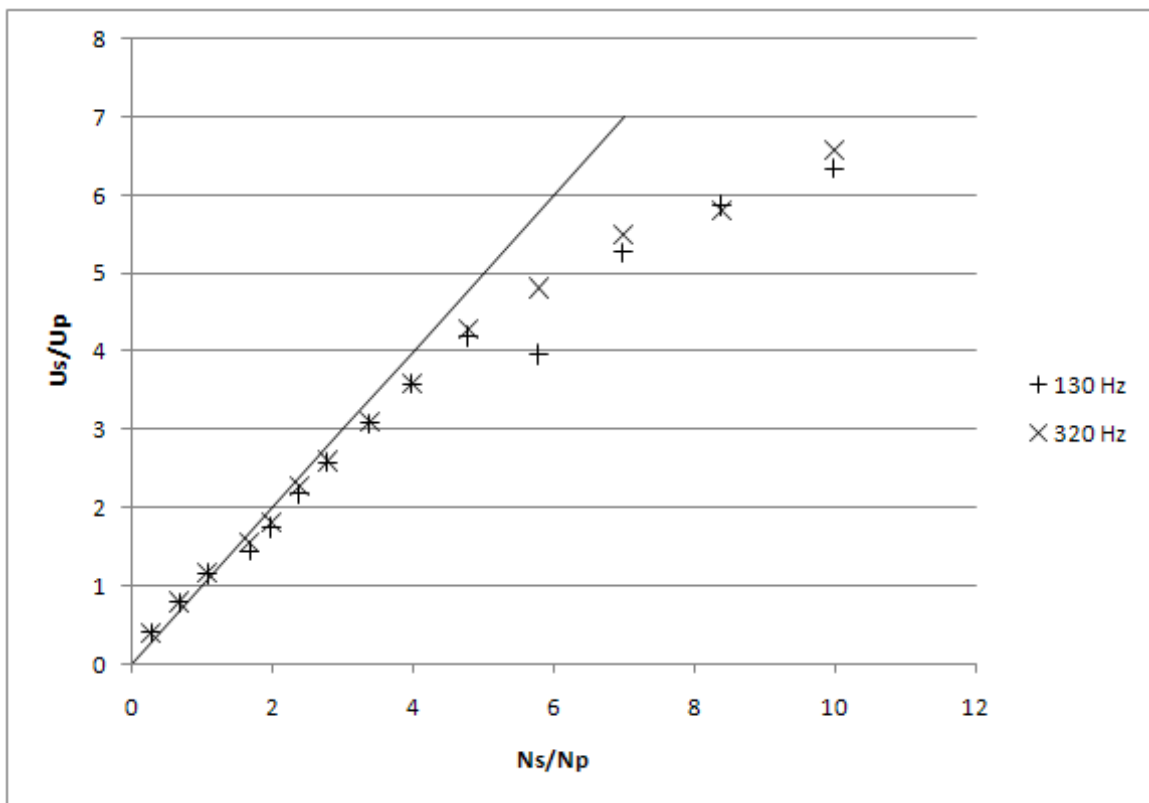
n	f [Hz]	R [ $\Omega$ ]	Z  [ $\Omega$ ]	$\Delta Z $ [ $\Omega$ ]
35	130	10	13,08	0,09
35	320	10	23,04	0,32
140	130	100	127,47	1,80
120	320	100	174,28	3,74

### 3.6 Zusammenhang zwischen Spannungsübersetzungsverhältnis und Windungszahl

Die Auftragung der Übersetzungsverhältnisse bei 10  $\Omega$  und 100  $\Omega$  liefert folgende Diagramme (siehe auch: Anhang 11 und 12)



Übersetzungsverhältnis bei 10 Ohm



Übersetzungsverhältnis bei 100 Ohm

Wie man erkennt, verringert sich das Übersetzungsverhältnis bei eingebauten Widerständen. Dabei sinkt dieses bei steigendem Windungszahlenverhältnis. Bei  $10\Omega$  sinkt das Spannungsverhältnis wesentlich stärker als bei  $100\Omega$

### 3.7 Fehlerbetrachtung

Bei den qualitativen Versuchsteilen stimmen die Werte und Diagramme gut mit der Theorie überein. Auch die Bestimmung des Kopplungsgrades liefert sinnvolle Ergebnisse, die sich im Rahmen des berechneten Fehlers befinden. Eine Bewertung der Induktivitäten ist schwierig, da hier keine weiteren Vergleichsdaten vorliegen. Es zeigt sich allerdings (Anhang 5 bis 8), dass  $L_2 \sim N_2^2$  und  $L_{12} \sim N_2$  ist. Die Induktivitäten sind außerdem im Bereich sinnvoller Größenordnungen.

## Quellen

[1] W. Demtröder, Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik, Axel Springer Verlag, 2006

[2] W. Walcher, Praktikum der Physik, Stuttgart, 1989

[3] David R. Lide , CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84. Auflage, 2003

[4] J. Krause, J. Grehn, Metzler Physik, Schroedel Verlag GmbH, Hannover 2004

Anmerkung: Alle Vergleichswerte stammen von [3]