

Transformator

(v. A. Reichert)

1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis	2
2. Einleitung	3
3. Physikalische Grundlagen	5
3.1 Theorie	5
3.2 Versuche	8
3.2.1 Unbelasteter Trafo	8
3.2.2 Belasteter Trafo	9
3.2.3 Hochspannungstrafo	11
3.2.4 Hochstromtrafo	12
4. Anwendungen	14
4.1 Hochspannungsnetze	14
4.1.1 Physikalische Grundlagen	14
4.1.2 Versuche	17
4.2 Kleintrafos für elektronische Geräte	22
4.2.1 Schaltplan	22
4.2.2 Versuch	23

2. Einleitung

Als Michel Faraday Anfang des 19. Jahrhunderts die elektromagnetische Induktion entdeckte, ahnte er gewiss nicht einmal ansatzweise, welche technische Revolution er damit lostreten würde. Heute sind die Anwendungen des von ihm gefundenen Gesetzes so vielfältig, dass man sie gar nicht mehr alle aufzählen kann. Der Strom kommt aus der Steckdose, das versteht sich von selbst. Und Steckdosen sind überall zu finden. Die Frage, wie er darein kommt, ist den meisten schon ziemlich egal. Hauptsache, er ist da. Und wehe, wenn der Strom mal für ein paar Stunden ausfällt, sei es durch einen technischen Defekt oder durch einen Sturm, etwa im Winter. Es wird schlagartig dunkel, kalt und irgendwie unheimlich. Denn wer hat heute für diesen Fall noch Kerzen parat. Aber von Faradays Entdeckung bis zur heute selbstverständlich flächendeckenden Stromversorgung war ein langer Weg. Entscheidende Beiträge leisteten vor allem Edison mit der Erfindung der Glühbirne, Tesla mit der Entwicklung des Drehstromnetzes und des Drehstrommotors und Westinghouse, der die Ideen Teslas durchsetzte. Dass sich dabei ein wahrer Stromkrieg abgespielt hat, wissen heute nur noch Fachleute. Es ging um die Einführung eines Stromnetzes auf Gleichstrombasis oder Wechselstrombasis. Dass Westinghouse und Tesla letztendlich als Sieger aus diesem Streit mit Edison hervorgingen, lag daran, dass sich Wechselstrom durch elektromagnetische Induktion transformieren lässt und somit verlustärmer über weite Strecken transportiert werden kann. Da aber viele Geräte mit kleiner Gleichspannung betrieben werden müssen, etwa die ganzen elektronischen Geräte, mussten im Laufe der Zeit zahlreiche Umformer entwickelt werden, die es erlauben, Wechselstrom hoher Spannung in Gleichstrom kleiner Spannung umzuwandeln. Andererseits liefern Solarzellen kleine Gleichspannungen, die zunehmend ins Wechselstromnetz eingespeist werden. Sie müssen dazu mit Wechselrichtern in Wechselspannung umgeformt und über Transformatoren auf die benötigte Spannung gebracht werden. Und ohne riesige Transformatoranlagen wäre eine flächendeckende Stromversorgung nicht möglich. Aber im Laufe der Zeit zeigte auch das Wechselstromnetz Schwächen. Bei sehr langen Leitungen strahlen die Leitungen Energie in Form elektromagnetischer Wellen ab, da sie wie Antennen wirken. Außerdem nehmen die Induktivität und die Kapazität der Leitung zu, der Blindstromanteil steigt, der Wirkstromanteil sinkt. Es kommt immer weniger nutzbare Leistung beim Verbraucher an. Es müssen aufwendige Ausgleichsmaßnahmen getroffen werden, etwa durch Einbau zusätzlicher Kapazitäten oder Induktivitäten, um den Blindstrom auszugleichen. Alternativ kann man den Strom mit Hochspannungsgleichstrom übertragen, da dann nur Ohmsche Verluste auftreten. Diese HGÜ-Technik wird immer häufiger eingesetzt, um große Entfernungen zu überbrücken, etwa in China, um Strom von den großen Wasserkraftwerken im Westen des Landes in die Ballungszentren des Ostens zu leiten. Auch zwischen Skandinavien und Mitteleuropa besteht eine sol-

che Verbindung. In Zukunft nimmt ihre Bedeutung zu, wenn Solarstrom aus der Sahara in großem Stil nach Europa oder Windstrom aus Offshore-Anlagen im Meer aufs Festland transportiert werden soll. Wie solche Leitungen funktionieren, erfahren sie ebenfalls in diesem Artikel. Allerdings lohnt sich der viel größere technische Aufwand nur bei langen Übertragungswegen. Alle diese Überlegungen machen deutlich, dass auch die Schulen sich diesem Thema stellen müssen. Denn Strom bleibt auch in Zukunft ein sehr wichtiger Energieträger, wenn nicht der wichtigste überhaupt.

Stolberg, im Dezember 2009

3. Physikalische Grundlagen

3.1 Theorie

Transformatoren dienen dazu, Wechselspannungen zu erhöhen oder zu erniedrigen, ohne dass eine nennenswerte Leistung verbraucht wird. So werden sie in Kraftwerken und Umspannanlagen eingesetzt, um den Haushaltswechselstrom verlustarm über längere Strecken zum Verbraucher transportieren zu können. Dazu wird die Spannung im Kraftwerk hochtransformiert und vor Ort in Umspannanlagen wieder heruntertransformiert. Solche Transformatoranlagen besitzen riesige Ausmaße. In Kleinnetzteilen, die für viele elektronische Geräte benötigt werden, dienen Transformatoren dazu, die Netzspannung von 230V auf einige wenige Volt zu verringern, da elektronische Geräte meist mit Kleinspannungen betrieben werden müssen. Mit so genannten Überträgern werden in der Kommunikationstechnologie Lautsprecher und Antennen an die elektronische Schaltung angekoppelt. Solche Trafos sind nur noch wenige Zentimeter groß.

Transformatoren bestehen aus zwei Spulen, die auf einen geschlossenen Eisenkern aufgebracht sind. An eine Spule, die Primärspule, wird die zu transformierende Spannung angelegt. An der zweiten Spule, der Sekundärspule, kann die gewünschte Spannung abgegriffen werden. Dabei ist das Verhältnis der Windungszahlen für das Übersetzungsverhältnis der Spannungen verantwortlich, wie im Folgenden gezeigt wird. Obwohl sich Transformatoren in der Praxis in vielfältiger Weise bewährt haben, ist eine geschlossene theoretische Beschreibung sehr schwierig, weil viele Faktoren berücksichtigt werden müssen. Zum einen besitzen Spulen aufgrund des Drahtes, aus dem sie gewickelt wurden, selbst einen Ohmschen Widerstand, der zu Verlusten führt, auch wenn der Transformator im Leerlauf betrieben wird. Zum zweiten hängt die Permeabilität eines Eisenkern vom Strom ab, was die Berechnungen erheblich erschwert. Zum dritten beeinflussen sich die beiden Spulen im Betrieb über den Eisenkern gegenseitig, was dazu führt, dass bis zu vier verschiedene Induktions- bzw. Selbstinduktionsspannungen in die Rechnung mit eingehen. Zu guter letzt müsste man auch noch berücksichtigen, dass der magnetische Fluss von der einen auf die andere Spule und umgekehrt nicht verlustfrei übertragen wird. Grundsätzlich gilt für beide Stromschleifen, die Primär- und die Sekundärschleife, das 1. Kirchhoffsche Gesetz. Die Summe aller Spannungen ist gleich der Klemmenspannung an den Enden der Spulen. Damit ergeben sich folgende Gleichungen für die beiden Stromzweige. Im Primärkreis gilt:

$$R_1 \cdot I_1 + U_{i12} + U_{i11} = U_1$$

Und im Sekundärkreis:

$$R_2 \cdot I_2 + R \cdot I_2 + U_{i22} + U_{i21} = U_2.$$

Darin bedeuten:

R_1	Ohmscher Widerstand der Primärspule
I_1	Strom in der Primärspule
U_{i12}	Induktionsspannung in der Primärspule, verursacht durch den magnetischen Fluss in der Sekundärspule
U_{i11}	Selbstinduktionsspannung in der Primärspule, verursacht durch den magnetischen Fluss in der Primärspule
U_1	Klemmenspannung an der Primärspule, entspricht der angelegten Spannung
R_2	Ohmscher Widerstand der Sekundärspule
I_2	Strom in der Sekundärspule
R	Ohmscher Widerstand des angeschlossenen Verbrauchers
U_{i22}	Selbstinduktionsspannung in der Sekundärspule, verursacht durch den magnetischen Fluss in der Sekundärspule
U_{i21}	Induktionsspannung in der Sekundärspule, verursacht durch den magnetischen Fluss in der Primärspule
U_2	Klemmenspannung an der Sekundärspule, entspricht der abnehmbaren Spannung

Setzt man die bekannten Gesetzmäßigkeiten für die Induktionsspannungen ein, so erhält man für den Primärkreis

$$R_1 \cdot I_1 - n_1 \cdot d\Phi_2/dt - n_1 \cdot d\Phi_1/dt = U_1 \quad (1)$$

und für den Sekundärkreis:

$$R_2 \cdot I_2 + R \cdot I_2 - n_2 \cdot d\Phi_2/dt - n_2 \cdot d\Phi_1/dt = U_2 \quad (2).$$

Hierin sind zusätzlich zu den Größen in obiger Tabelle:

n_1	Windungszahl der Primärspule
n_2	Windungszahl der Sekundärspule
Φ_1	magnetischer Fluss, verursacht durch den Strom I_1 in der Primärspule
Φ_2	magnetischer Fluss, verursacht durch den Strom I_2 in der Sekundärspule

Berücksichtigt man noch, dass in den magnetischen Fluss in den beiden Spulen die jeweilige Stromstärke eingeht, so ergibt sich insgesamt ein Differentialgleichungssystem 1. Ordnung für die Spannungen und die Ströme, das man nicht auf elementare Weise lösen kann. Für zwei Grenzfälle lässt sich jedoch eine Lösung finden.

Im ersten Fall nimmt man folgende Vereinfachungen an:

1) Die beiden Spulen besitzen keine Ohmschen Widerstände, was etwa bei supraleitenden Spulen der Fall wäre. Dann gilt:

$$R_1 = R_2 = 0.$$

2) Der Strom durch die zweite Spule ist null. Der Transformator wird also nicht belastet, sondern im Leerlauf betrieben. Daraus folgt:

$$I_2 = 0$$

und damit auch

$$\Phi_2 = 0.$$

Damit vereinfachen sich die Gleichungen (1) und (2) zu:

$$- n_1 \cdot d\Phi_1 / dt = U_1$$

und

$$- n_2 \cdot d\Phi_1 / dt = U_2.$$

Daraus erhält man für den unbelasteten Trafo:

$$U_1 / U_2 = n_1 / n_2$$

Die Spannungen an den Klemmen verhalten sich also wie die Windungszahlen. Im Primärkreis fließt außerdem reiner Blindstrom, so dass zwischen U_1 und I_1 eine Phasenverschiebung $\alpha = 90^\circ$ auftritt.

Im zweiten Fall macht man folgende Zusatzannahmen:

1) Die Ohmschen Widerstände der Spulen können wiederum vernachlässigt werden, so dass wie oben gilt:

$$R_1 = R_2 = 0.$$

2) Die Sekundärspule wird kurzgeschlossen, so dass die Klemmenspannung U_2 auf null sinkt, ebenso der Lastwiderstand R , ähnlich wie bei einer kurzgeschlossenen Solarzelle oder Batterie. Es ist damit:

$$U_2 = 0$$

$$R = 0.$$

Damit erhält man im Sekundärkreis aus der Gleichung (2):

$$- n_2 \cdot d\Phi_2 / dt = n_2 \cdot d\Phi_1 / dt.$$

und damit

$$-\Phi_1 = \Phi_2.$$

Setzt man die Gesetze für den magnetischen Fluss und das Magnetfeld einer Spule ein, so folgt:

$$- A_1 * B_1 = A_2 * B_2$$

und damit

$$- A_1 * \mu_r * \mu_0 * n_1 * I_1 / l_1 = A_2 * \mu_r * \mu_0 * n_2 * I_2 / l_2.$$

Nimmt man für beide Spulen den gleichen Querschnitt A und die gleiche Länge l an, was häufig schon durch die Ausmaße des Eisenkerns gewährleistet ist, so erhält man:

$$- n_1 * I_1 = n_2 * I_2$$

und daraus

$$I_1 / I_2 = - n_2 / n_1.$$

Die Ströme verhalten sich beim kurzgeschlossenen Trafo umgekehrt wie die Windungszahlen. Außerdem sind beide Ströme um 180° phasenverschoben. Im Sekundärkreis fließt reiner Wirkstrom, da von außen keine Spannung angelegt wird. Im Primärkreis setzt sich der Strom dagegen aus einer Mischung aus Wirk- und Blindstrom zusammen. Daher sinkt die Phasenverschiebung α zwischen U_1 und I_1 unter 90° . Im normal belasteten, also nicht kurzgeschlossenen Zustand gilt für sie nach dem Energieerhaltungssatz:

$$U_1 * I_1 * \cos\alpha = U_2 * I_2$$

und damit

$$\cos\alpha = U_2 * I_2 / (U_1 * I_1) \quad (3).$$

Außerdem sinkt in diesem Zustand mit zunehmender Belastung die Klemmenspannung U_2 an der Sekundärspule immer mehr ab, da die durch den Strom I_2 verursachte Induktionsspannung U_{i22} der von I_1 erzeugten Induktionsspannung U_{i21} immer stärker entgegenwirkt.

3.2 Versuche

Für die zwei folgenden Versuche wurde der Trafo der Firma Leybold benutzt. Er wird mit diversen Spulen geliefert, die man auf einen gemeinsamen geschlossenen Eisenkern stecken kann (s. Abb.1). Der Eisenkern ist lamellenartig aufgebaut.

3.2.1 Unbelasteter Trafo

Aufbau:

Man baut die Schaltung nach Abb.2 auf. An die Primärspule wird eine regelbare Wechselspannungsquelle und ein Voltmeter angeschlossen. Die Sekundärspule wird mit einem zweiten Voltmeter verbunden.

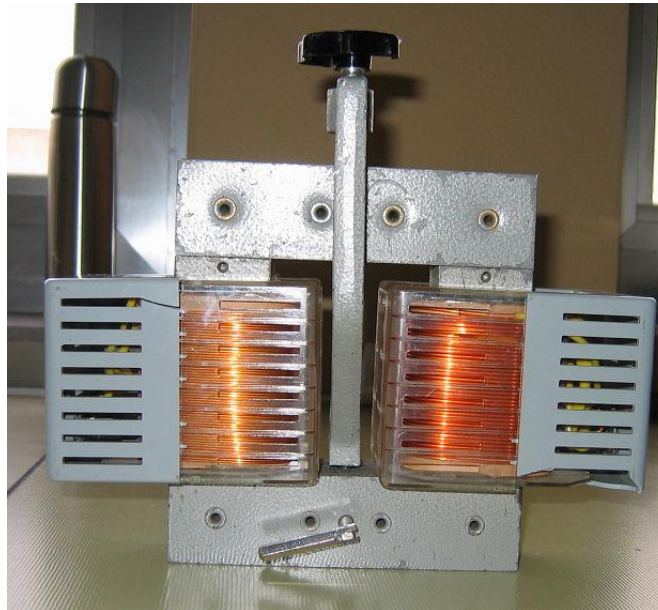


Abb.1: Leybold-Trafo

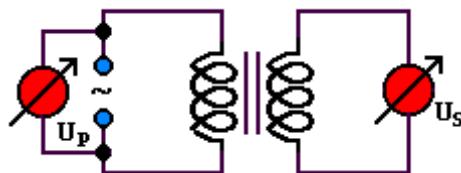


Abb.2: unbelasteter Trafo

Durchführung:

Man stellt auf der Primärseite verschiedene Spannungen ein und liest jeweils beide Voltmeter ab. Dann tauscht man die Spulen aus und wiederholt die Messungen.

Beobachtung:

Für verschiedene Primär- und Sekundärspulen erhält man Tabelle 1.

Ergebnis:

Der Quotient aus der Sekundärspannung und Primärspannung ist stets etwas kleiner als der Quotient aus den Windungszahlen. Das liegt daran, dass der magnetische Fluss nicht verlustfrei von der Primärspule auf die Sekundärspule übertragen wird. Die gemessenen Sekundärspannungen sind daher etwas kleiner als theoretisch möglich.

3.2.2 Belasteter Trafo

Aufbau:

Abb.3 zeigt den benötigten Versuchsaufbau. Die Primärspule hat 1000 Windungen, die Sekundärspule 500 Windungen. Am Widerstand von 2Ω wird die Primärstromstärke abgegriffen und auf dem zweiten Kanal des Oszillographen sichtbar gemacht. Der 1. Kanal zeichnet die Primärspannung auf. Über das Poti im Sekundärkreis kann man den Trafo unterschiedlich stark belasten.

U_P [V]	U_S [V]	n_P	n_S	U_S/U_P	n_S/n_P
5	1,1	1000	250	0,22	0,25
5	2,3	1000	500	0,46	0,5
5	4,5	1000	1000	0,9	1
5	9,2	500	1000	1,84	2
10	2,2	1000	250	0,22	0,25
10	4,8	1000	500	0,48	0,5
10	9,2	1000	1000	0,92	1
10	19	500	1000	1,9	2
15	3,5	1000	250	0,23	0,25
15	7,3	1000	500	0,49	0,5
15	14	1000	1000	0,93	1
15	28	500	1000	1,87	2
20	4,5	1000	250	0,23	0,25
20	9	1000	500	0,45	0,5
20	19	1000	1000	0,95	1
20	37,5	500	1000	1,88	2
25	5,5	1000	250	0,22	0,25
25	11,5	1000	500	0,46	0,5
25	23,5	1000	1000	0,94	1
25	47	500	1000	1,88	2
30	6,8	1000	250	0,23	0,25
30	14	1000	500	0,47	0,5
30	28,7	1000	1000	0,96	1
30	56,5	500	1000	1,88	2

Tabelle 1: Messergebnisse unbelasteter Trafo

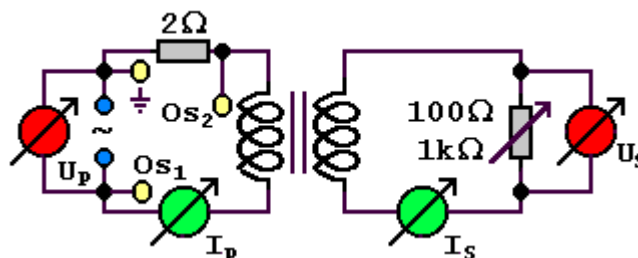


Abb.3: belasteter Trafo

Durchführung:

Man baut die Schaltung nach Abb.3 ohne Poti auf und schaltet alle Geräte ein. Man stellt eine Primärspannung $U_P = 15V$ ein und liest den Primärstrom I_P , die Sekundärspannung U_S und den Sekundärstrom I_S ab. Anschließend wird das Poti auf seinen höchsten Wert gedreht und in die Schaltung eingebaut. Es wird nach und nach soweit heruntergeregelt, bis der Sekundärstrom die Werte 0,05A, 0,1A, 0,015A einnimmt. Zuletzt wird es ganz heruntergedreht. Für jede Stellung notiert man die Werte an den vier Messgeräten. Außerdem verschiebt man die Oszillographenbilder jeweils so weit, dass die Primärspannungskurve einer Sinuskurve entspricht. Dann ermittelt man an der Stromkurve die momentane Elongation $I(t)$ und die Amplitude I_0 . Dazu teilt man die am Oszillographen auf Kanal 2 abgelesenen Span-

nungswerte durch den Widerstandswert von 2Ω . Aus beiden Werten errechnet man den Phasenwinkel α mit folgender Gleichung:

$$\alpha = \arcsin(I(t)/I_0).$$

Beobachtung:

Bei einer Messreihe erhält man Tabelle 2.

U_P [V]	I_P [A]	U_S [V]	I_S [A]	α_{gem} [°]	α_{err} [°]	η [%]
15	0,013	7,3	0	~90	90	-
15	0,033	6,5	0,05	42	49	65,7
15	0,058	5,3	0,1	49	52,5	60,9
15	0,084	3	0,15	63	69	35,8
15	0,095	0,2	0,18	~85	88,6	2,4

Tabelle 2: Messergebnisse belasteter Trafo

Auswertung:

Die Phasenwinkel α_{err} in der vorletzten Spalte ermittelt man mit der Gleichung (3) aus Kapitel 3.1. Zunächst erkennt man, dass sich die Stromstärken im kurzgeschlossenen Falle näherungsweise umgekehrt wie die Windungszahlen verhalten. Außerdem sinkt die Sekundärspannung im kurzgeschlossenen Fall nicht ganz auf Null, da die Kabel auch einen Widerstand haben. Die gemessenen und berechneten Phasenwinkel stimmen im Rahmen der Messgenauigkeit recht gut überein. Für den Wirkungsgrad η des Trafos erhält man:

$$\eta = (U_S * I_S * 100\%) / (U_P * I_P)$$

$$= \cos(\alpha_{gem}) * 100\%.$$

Die Werte des Wirkungsgrades für die verschiedenen Belastungen des Trafos entnehmen Sie der letzten Spalte der Tabelle. Sie bewegen sich in einem Bereich, der für handelsübliche Trafos z.B. für Halogenlampen gilt. Nur moderne Ringkerntransformatoren bringen es auf Wirkungsgrade um 95% (s. Kapitel 4.1.2).

3.2.3 Hochspannungstrafo

Aufbau:

Man benutzt den Trafo von Leybold mit 500 Windungen auf der Primärseite und 23000 Windungen auf der Sekundärseite. An die Sekundärseite schließt man über Isolatoren zwei Hornelektroden an, die an der schmalsten Stelle einen Abstand von 3-4 mm haben (s. Abb. 4). Die Primärseite wird mit der Steckdose verbunden.

Durchführung:

Man schaltet den Strom ein und verschiebt die Hornelektroden vorsichtig ein wenig hin und her, bis sich ein Lichtbogen ausbildet. Dabei dürfen sie sich auf keinen Fall berühren.

Beobachtung:

Der Lichtbogen zündet an der engsten Stelle zwischen den Elektroden und läuft nach oben die Elektroden entlang. Reißt er oben ab, so startet bei richtigem Abstand der Elektroden unten ein neuer Bogen. Manchmal tritt ein chlorartiger Geruch auf.

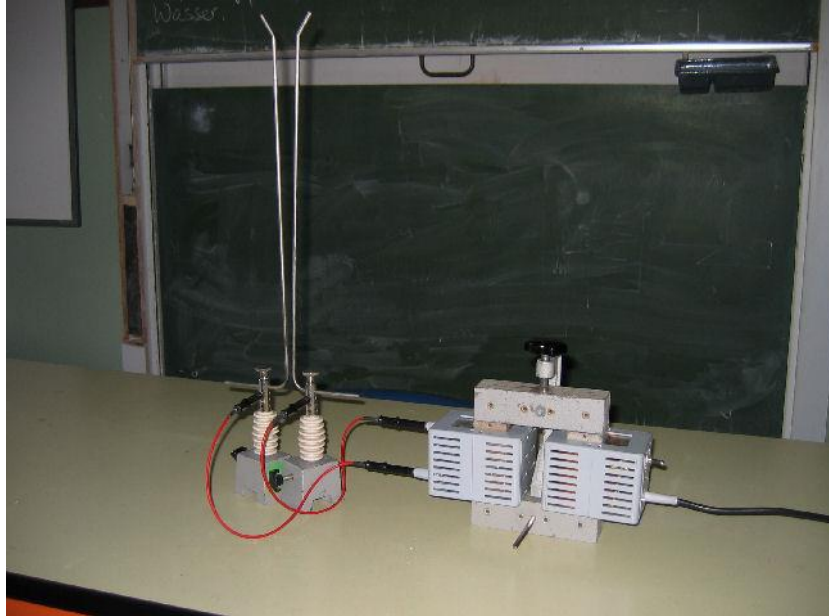


Abb. 4: Hochspannungstrafo

Erklärung:

Zwischen den Elektroden entsteht eine Spannung von ca. 10 kV, die die Luft auf eine Entfernung von einigen Millimetern leitend macht. Dabei reagiert der Stickstoff der Luft mit dem Sauerstoff zu Stickoxiden, die einen chlorartigen Geruch haben. Der Bogen läuft nach oben und wird dabei breiter, weil bei der chemischen Reaktion Wärme entsteht, die die Luft erhitzt und damit besser leitend macht. Außerdem hat warme Luft eine kleinere Dichte als kalte und steigt deshalb auf. Nimmt man an, dass zwischen den Elektroden nur ein geringer Strom fließt, so kann man das Gesetz des unbelasteten Trafos anwenden, um die Sekundärspannung zu berechnen. Es gilt:

$$\begin{aligned} U_S &= U_P \cdot n_S / n_P \\ &= 230V \cdot 23000 / 500 \\ &= 10580V \end{aligned}$$

3.2.4 Hochstromtrafo**Aufbau:**

Man benutzt den Trafo von Leybold mit 500 Windungen auf der Primärseite und 5 Windungen auf der Sekundärseite. Die Sekundärspule wird über eine Eisenstange kurzgeschlossen (s. Abb. 5). Die Primärseite verbindet man über ein Amperemeter und eine Sicherheitssteckdose mit dem Stromnetz.

Durchführung:

Man schaltet den Strom ein und wartet einige Minuten.

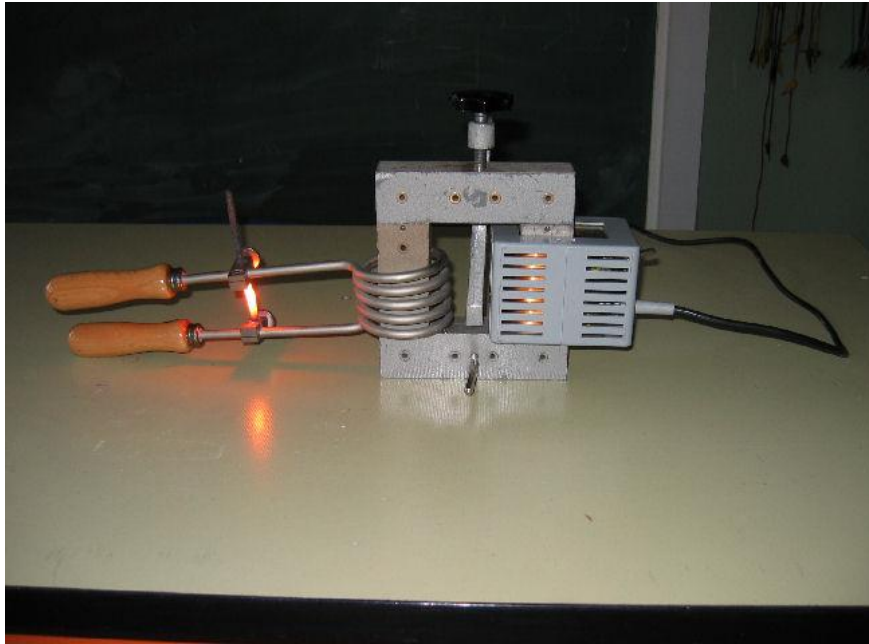


Abb. 5: Hochstromtrafo

Beobachtung:

Nach und nach wird das Rundeisenstück glühend heiß und kann sogar schmelzen. Das Amperemeter zeigt einen Primärstrom von 4,5 A an.

Erklärung:

Da die Sekundärspule nur wenige Windungen besitzt und außerdem über das Eisenstück mit sehr kleinem Widerstand praktisch kurzgeschlossen ist, fließt ein sehr großer Sekundärstrom. Man kann ihn näherungsweise mit dem Gesetz für einen kurzgeschlossenen Trafo berechnen. Es gilt:

$$\begin{aligned} I_S &= I_P \cdot n_P / n_S \\ &= 4,5 \text{ A} \cdot 500 / 5 \\ &= 450 \text{ A}. \end{aligned}$$

Dieser sehr hohe Strom setzt sehr viel Ohmsche Wärme frei, da sie mit dem Quadrat des Stromes zunimmt. Die enorme Wärme bringt den Eisenstab zum Glühen und nach einiger Zeit sogar zum Schmelzen. Diese Erscheinung wird beim Elektroschweißen ausgenutzt.

4. Anwendungen

4.1 Hochspannungsnetze

4.1.1 Physikalische Grundlagen

Die Herzstücke der heutigen Stromversorgung sind die Kraftwerke, die Umspannwerke und die Hochspannungsnetze, mit denen der Strom von den Kraftwerken zu den Verbrauchern transportiert wird. Dabei wird heute fast ausschließlich Wechselstrom eingesetzt (s. Abb.1 und Abb.2).

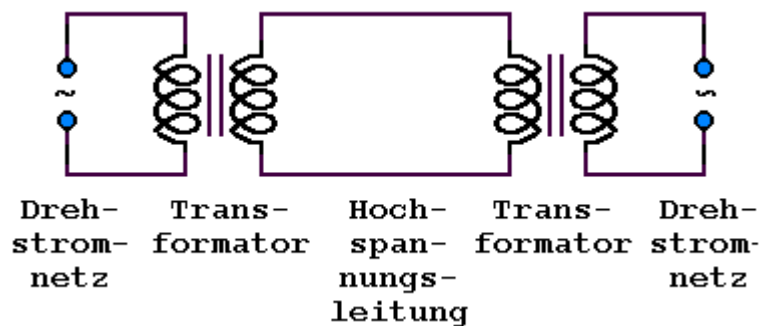


Abb.1: Hochspannungswechselstromübertragung



Abb.2: Umspannwerk Heimbach/Eifel

Bei seiner Übertragung sind die Verluste im Ohmschen Widerstand der Leitungen wesentlich geringer, da man ihn auf höhere Spannungen transformieren kann. Dadurch sinkt die benötigte Stromstärke und mit ihr die Verluste in Form von Wärme. Das kann man mit einer kleinen Rechnung gut verdeutlichen. Ein Haushalt benötigt etwa eine mittlere Leistung $P = 1\text{kW}$. Sie soll mit einer Überlandleitung von $l = 100\text{ km}$ Länge vom Kraftwerk zum Haus transportiert werden und zwar einmal bei einer

Spannung von $U_1 = 230\text{V}$ und ein zweites Mal bei einer Spannung $U_2 = 220000\text{V}$. Zunächst berechnet man den Ohmschen Widerstand der Leitung. Es gilt:

$$\begin{aligned}l &= 100 \text{ km} \\ \rho &= 0,027 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m} \\ A &= 250 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

und damit

$$\begin{aligned}R &= \rho \cdot l / A \\ &= 0,027 \cdot 100000 / 250 \text{ (}\Omega\text{mm}^2 \cdot \text{m} / (\text{m} \cdot \text{mm}^2)) \\ &= 10,8 \text{ } \Omega.\end{aligned}$$

Die zu übertragende Stromstärke beträgt im ersten Fall

$$\begin{aligned}I_1 &= 1000\text{W} / 230\text{V} \\ &= 4,35 \text{ A}\end{aligned}$$

und im zweiten Fall

$$\begin{aligned}I_2 &= 1000\text{W} / 220000\text{V} \\ &= 0,00455 \text{ A}.\end{aligned}$$

Damit erhält man für die Verlustleistung P_V durch Ohmsche Wärme in den beiden Fällen:

$$\begin{aligned}P_{V1} &= R \cdot I^2 \\ &= 10,8 \Omega \cdot (4,35\text{A})^2 \\ &= 204,4\text{W}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{V2} &= 10,8 \Omega \cdot (0,00455\text{A})^2 \\ &= 0,224\text{mW}.\end{aligned}$$

Im ersten Fall gehen prozentual immerhin

$$\begin{aligned}Pr_1 &= 204,4\text{W} \cdot 100\% / 1000\text{W} \\ &= 20,4\%\end{aligned}$$

im zweiten Fall aber nur

$$\begin{aligned}Pr_2 &= 0,000224\text{W} \cdot 100\% / 1000\text{W} \\ &= 2,24 \cdot 10^{-5}\%\end{aligned}$$

der Leistung verloren. Im ersten Fall schlagen die Verluste auf Dauer ganz schön zu Buche, im zweiten Fall kann man die Verluste vollkommen vernachlässigen. Außerdem müsste man im ersten Fall den Strom mit einer höheren Spannung einspeisen und damit mit einer höheren Leistung, damit beim Verbraucher überhaupt eine Spannung von $U_0 = 230\text{V}$ ankommt. Die Einspeisenspannung U_e wäre zudem von der Länge des Übertragungsweges ab-

hängig, eine Situation, die rein praktisch mit einem enormen Aufwand verbunden wäre, denn jeder Verbraucher müsste je nach Länge der Leitung mit einer anderen Spannung versorgt werden. In unserem Fall wäre eine Einspeisespannung U_e von

$$\begin{aligned}U_e &= U_0 + R \cdot I \\ &= 230\text{V} + 4,35\text{A} \cdot 10,8\Omega \\ &= 277\text{V}\end{aligned}$$

erforderlich. Bei einer eingehenden Analyse muss man allerdings auch die Verluste in den Transformatoren berücksichtigen, die, wie der Versuch in Kapitel 4.1.2 zeigt, erheblich zu Buche schlagen können und die Ohmschen Verluste sogar übersteigen können. Werden die Leitungen länger, so geht Energie auch durch elektromagnetische Strahlung verloren. Bei einer Länge

$$\begin{aligned}l &= \lambda/4 \\ &= c / (4 \cdot f) \\ &= 3 \cdot 10^8 (\text{m/s}) / (4 \cdot 50\text{Hz}) \\ &= 1500000\text{m} \\ &= 1500\text{km}\end{aligned}$$

wirkt die Leitung wie ein $\lambda/4$ Dipol, der die elektromagnetische Wellen der Frequenz $f = 50\text{Hz}$ optimal abstrahlen kann. Nähert sich die Kabellänge diesem Wert, so steigen die Strahlungsverluste immer weiter an. Außerdem nehmen mit der Länge die Induktivität und die Kapazität der Leitung zu. Der Blindstromanteil steigt, der Wirkstromanteil sinkt. Soll Solarstrom aus der Sahara nach Europa transportiert werden, so besitzt die Leitung eine Länge, die in dieser Größenordnung liegt. Daher müsste in diesem Fall eine andere Lösung gesucht werden. Sie existiert bereits und wurde in China auf einer Länge von 2000km erfolgreich getestet. Das Zauberwort heißt Hochspannungsgleichstromübertragung HGÜ. Die grundsätzliche Vorgehensweise zeigt Abb.3.

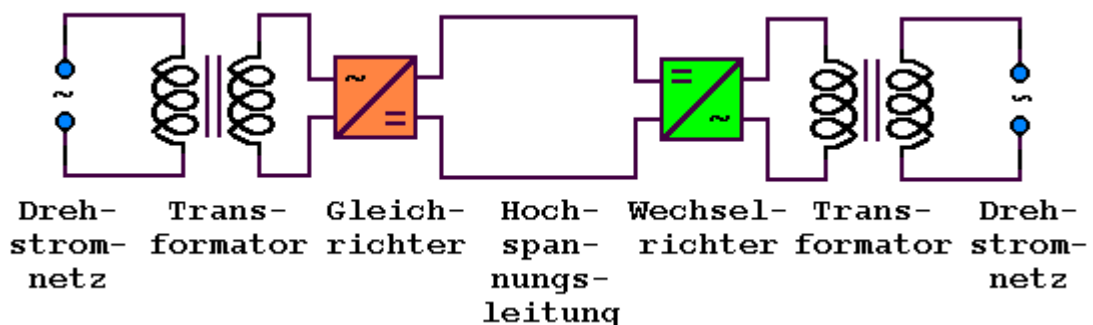


Abb.3: Hochspannungsgleichstromübertragung

Die im Kraftwerk erzeugte Wechselspannung wird zunächst wie gehabt hoch transformiert, dann gleichgerichtet und als Hochspannungsgleichstrom übertragen, vor Ort wieder in Wechsel-

spannung zurückverwandelt und dann auf die benötigte Spannung für die Haushalte runter transformiert. Dabei dürfen die Gesamtverluste in den einzelnen Umwandlungsprozessen die zuvor auftretenden Strahlungsverluste nicht übersteigen, damit sich der zusätzliche technische Aufwand überhaupt lohnt. Die Ohmschen Verluste sind für beide Stromarten gleich.

4.1.2 Versuche

In den folgenden Versuchen werden die Vorgänge bei der Hochspannungswechselstromübertragung mit handelsüblichen Mitteln demonstriert. Dazu benötigt man zwei Ringkerntransformatoren, die primärseitig mit 230V belastet werden können und sekundärseitig eine Spannung von 12 V liefern. Sie werden für Halogenlampen eingesetzt. Man kann sie z.B. bei der Firma Conrad beziehen. Zur Sicherheit montiert man sie auf einem Holzbrett. Die Zuleitungen erfolgen über Telefonbuchsen. Am Holzbrett befestigt man außerdem zwei Hochlastwiderstände mit den Daten $100\Omega/5W$ und mit je einer Fassung zwei Halogenlampen mit den Kenndaten 12V/20W. Den Aufbau des fertigen Brettes zeigt Abbildung 1.

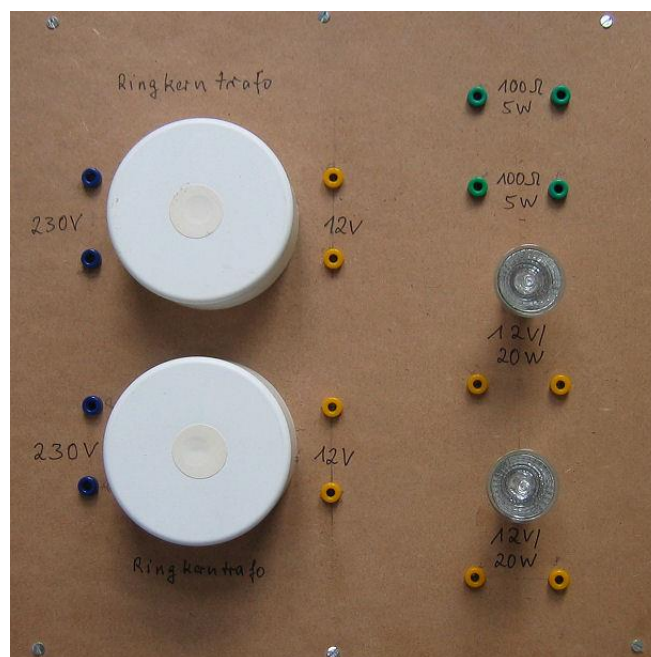


Abb. 1: Versuchsbrett

Versuch 1:

Aufbau und Durchführung:

Man schließt eine der beiden Halogenlampen an eine Wechselspannungsquelle von 12 V an oder an die Sekundärseite einer der beiden Trafos. Die Primärseite wird im zweiten Fall über eine Sicherheitssteckdose mit dem Stromnetz verbunden. Dann misst man die Spannung an der Lampe und den Strom durch die Lampe.

Beobachtung:

Die Lampe leuchtet hell auf. Man erhält z.B. folgende Werte:

$$U_L = 12,6\text{V}$$

$$I_L = 1,68\text{A}.$$

Ergebnis:

Die Lampe hat eine elektrische Leistung P_L von

$$P_L = 12,6\text{V} \cdot 1,68\text{A}$$

$$= 21,1\text{W}.$$

Versuch 2:

Aufbau und Durchführung:

Man wiederholt Versuch 1, allerdings legt man zwischen die Lampe und die Stromquelle einen Widerstand $R = 50\Omega$. Dazu schaltet man die beiden 100Ω -Widerstände parallel. Dann liest man wiederum den Strom I_{RL} und die Spannungen U_R und U_L ab, die am Widerstand bzw. der Lampe abfallen (s. Abb. 2).

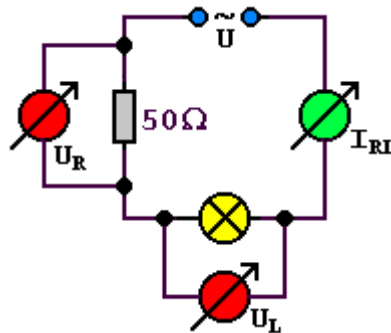


Abb.2: Aufbau Versuch 2

Beobachtung:

Die Lampe leuchtet nicht. Man misst folgende Werte:

$$U_R = 12,4\text{V}$$

$$U_L = 0,2\text{V}$$

$$I_{RL} = 0,25\text{A}.$$

Ergebnis:

An der Lampe fällt nur eine sehr geringe Spannung ab. Daher leuchtet sie nicht. Eigentlich hätte man eine höhere Spannung an der Lampe erwarten können, da sie nach den Ergebnissen aus Versuch 1 einen Widerstand R_L haben sollte, für den gilt:

$$R_L = 12,6\text{V} / 1,68\text{A}$$

$$= 7,5\Omega.$$

Damit beträgt der Gesamtwiderstand R_{ges} im Kreis

$$R_{ges} = 50\Omega + 7,5\Omega$$

$$= 57,5\Omega.$$

Damit müsste sich der Strom I_{RL} auf

$$I_{RL} = 12,6/57,5\Omega$$

$$= 0,22A$$

belaufen. An der Lampe müsste man eine Spannung von

$$U_L = 0,22A * 7,5\Omega$$

$$= 1,64V$$

messen. Dass der tatsächliche Wert wesentlich geringer ist, hat seine Ursache darin, dass der Glühdraht einer Lampe im kalten Zustand einen viel kleineren Widerstand hat als im warmen Zustand. Daher fällt auch die gemessene Stromstärke höher aus als erwartet. Die am Widerstand auftretenden Leistungsverluste P_R belaufen sich auf

$$P_R = 12,4V * 0,25A$$

$$= 3,1W.$$

Sie machen damit fast die gesamte eingespeiste Leistung P von

$$P = 12,6V * 0,25A$$

$$= 3,15W$$

aus. Prozentual werden

$$Pr = 3,1W * 100\% / 3,15W$$

$$= 98,4\%$$

der aufgebrachten Leistung P nutzlos am Widerstand in Wärme umgewandelt. Wollte man die Lampe zum Leuchten bringen, müsste man ein Vielfaches der von der Lampe benötigten Leistung P_L in den Stromkreis einspeisen, und zwar

$$P = R_{ges} * I_{RL}^2$$

$$= 57,5\Omega * (1,68A)^2$$

$$= 162,3W.$$

Davon würden nur 21,2W in der Lampe genutzt und 141,1W am Vorwiderstand nutzlos in Wärme umgewandelt. Die Schaltung hätte damit nur einen Wirkungsgrad η von

$$\eta = 21,2W * 100\% / 162,3W$$

$$= 13,1\%.$$

Wie man die Energie effektiver nutzen kann, zeigt der folgende Versuch.

Versuch 3:

Aufbau:

Den benötigten Versuchsaufbau entnehmen Sie Abb.3. Der Widerstand zwischen Stromquelle und Lampe liegt zwischen zwei Trafos.

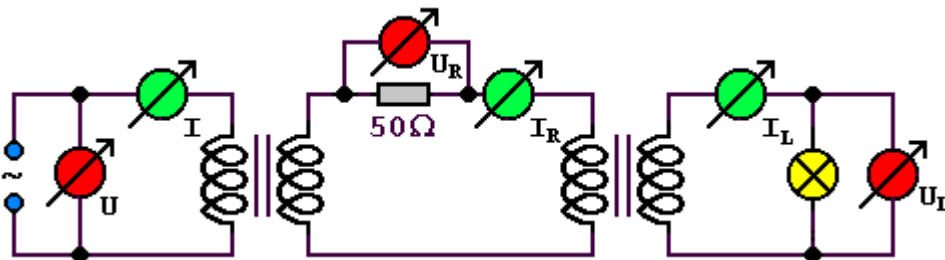


Abb.3: Aufbau Versuch 3

Durchführung:

Man baut den Versuch nach Abb. 3 auf, schaltet die Wechselspannungsquelle U mit 12V ein und misst die Ströme und die Spannungen im Stromkreis an den angegebenen Stellen.

Beobachtung:

Die Lampe leuchtet fast so hell auf wie in Versuch 1. Man erhält folgende Messwerte:

- $U_L = 11,0V$
- $I_L = 1,60A$
- $U_R = 4,8V$
- $I_R = 0,098A$
- $U = 12,6V$
- $I = 1,66A.$

Erklärung:

Der erste Transformator setzt die Spannung hoch, der zweite transformiert sie wieder auf die Betriebsspannung der Lampe herunter. Um die für die Lampe benötigte Leistung P_L zu übertragen, ist daher nur ein geringer Strom I_R durch den Widerstand erforderlich. Dieser Strom verursacht eine wesentlich geringere Verlustleistung P_R am Widerstand von

$$\begin{aligned}
 P_R &= R \cdot I^2 \\
 &= 50\Omega \cdot (0,098A)^2 \\
 &= 0,48W.
 \end{aligned}$$

Für die an der Lampe ankommende Leistung P_L folgt aus den Messwerten:

$$\begin{aligned}
 P_L &= U_L \cdot I_L \\
 &= 11,0V \cdot 1,6A \\
 &= 17,6W.
 \end{aligned}$$

Eingespeist wird auf der Primärseite des ersten Trafos eine Leistung von

$$\begin{aligned} P &= 12,6\text{V} \cdot 1,66\text{A} \\ &= 20,9\text{W}. \end{aligned}$$

Damit besitzt die Schaltung einen Wirkungsgrad von

$$\begin{aligned} \eta &= 17,6\text{W} \cdot 100\% / 20,9\text{W} \\ &= 84,2\%. \end{aligned}$$

Die Verluste sind vor allem auf den nicht hundertprozentigen Wirkungsgrad der verwendeten Transformatoren zurückzuführen. An den beiden Trafos geht eine Leistung P_T von

$$\begin{aligned} P_T &= 20,9\text{W} - 17,7\text{W} - 0,48\text{W} \\ &= 2,72\text{W}, \end{aligned}$$

an jedem also

$$P_{T1} = 1,36\text{W}.$$

Sie haben damit einen Wirkungsgrad η_T von

$$\begin{aligned} \eta_T &= (20,9\text{W} - 1,36\text{W}) \cdot 100\% / 20,9\text{W} \\ &= 93,5\%. \end{aligned}$$

Insgesamt ist der Wirkungsgrad der gesamten Schaltung erheblich größer als bei Versuch 2. Daher kann man mit ihr hohe Leistungen mit kleinen Verlusten über längere Kabel übertragen. Sie wird bei Überlandleitungen in vielfältiger Weise genutzt und war der Schlüssel zum Siegeszug der Wechselspannung im Stromkrieg, da nur Wechselspannung mit Transformatoren erhöht bzw. erniedrigt werden kann. Der errechnete Wirkungsgrad der Ringkerntrafos lässt sich mit folgendem Versuch direkt überprüfen.

Versuch 4:

Aufbau:

Man schließt einen der beiden Ringkerntrafos mit der Primärseite über eine Sicherheitssteckdose ans Stromnetz an. An die Sekundärseite legt man eine der beiden Halogenlampen (s. Abb. 4)

Durchführung:

Man liest an den Voltmetern die Spannungen U_P und U_S und den Amperemetern die Stromstärken I_P und I_S ab.

Beobachtung:

Man erhält folgende Messwerte:

$$\begin{aligned} I_P &= 0,108\text{A} \\ U_P &= 235\text{V} \\ I_S &= 1,77\text{A} \\ U_S &= 13,4\text{V} \end{aligned}$$

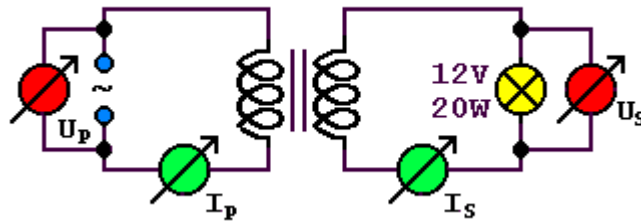


Abb. 4: Aufbau Versuch 4

Auswertung:

Daraus ergibt sich der Wirkungsgrad des Trafos zu:

$$\begin{aligned} \eta_T &= I_S \cdot U_S \cdot 100\% / (I_P \cdot U_P) \\ &= 1,77\text{A} \cdot 13,4\text{V} \cdot 100\% / (0,108\text{A} \cdot 235\text{V}) \\ &= 93,5\%. \end{aligned}$$

Dieser Wert entspricht exakt dem in Versuch 3 errechneten Wirkungsgrad.

4.2 Kleintrafos für elektronische Geräte

4.2.1 Schaltplan

Elektronische Geräte wie Handys, MP3-Player, Radios, Walkman oder auch LED-Lichterketten benötigen kleine Gleichspannungen. Will man sie daher am Netz mit 230V-Wechselspannung betreiben, so braucht man ein Netzgerät. Bei geringer Anforderung an die Güte der Gleichspannung reicht ein Gerät nach Abb.1 aus.

Es besteht aus vier Baugruppen:

- a) einem Kleintrafo mit einem oder mehreren Sekundärausgängen für verschiedene Spannungen,
- b) einem Brückengleichrichter aus vier Dioden oder in Form eines integrierten Bausteins,
- c) einem Kondensator und
- d) bei mehreren Sekundärspannungen einem Wahlschalter.

Diese vier Einheiten kann man in Abb.1 deutlich erkennen. Den genauen elektronischen Aufbau entnehmen Sie Abb.2. Zunächst wird die Wechselspannung auf 3 - 12 V heruntertransformiert, dann mit vier Dioden gleichgerichtet und mit dem Kondensator geglättet. Dabei wechselt die Polung an den Eingängen des Gleichrichters wegen der Netzfrequenz von 50Hz in jeder Sekunde 100 mal. Liegt am linken Eingang plus und am rechten minus an, verdeutlicht durch die roten Plus- und Minuszeichen, so leiten die beiden roten Dioden den Strom, bei umgekehrter Polung die grünen. So ist gewährleistet, dass der obere Ausgang des Netzgerätes stets der Pluspol und der untere der Minuspol ist. Mit dem Kondensator wird die so gewonnene pulsierende Gleichspannung geglättet. Um die Ausgangsspannung des Gerätes zu überprüfen, führt man folgenden Versuch durch.

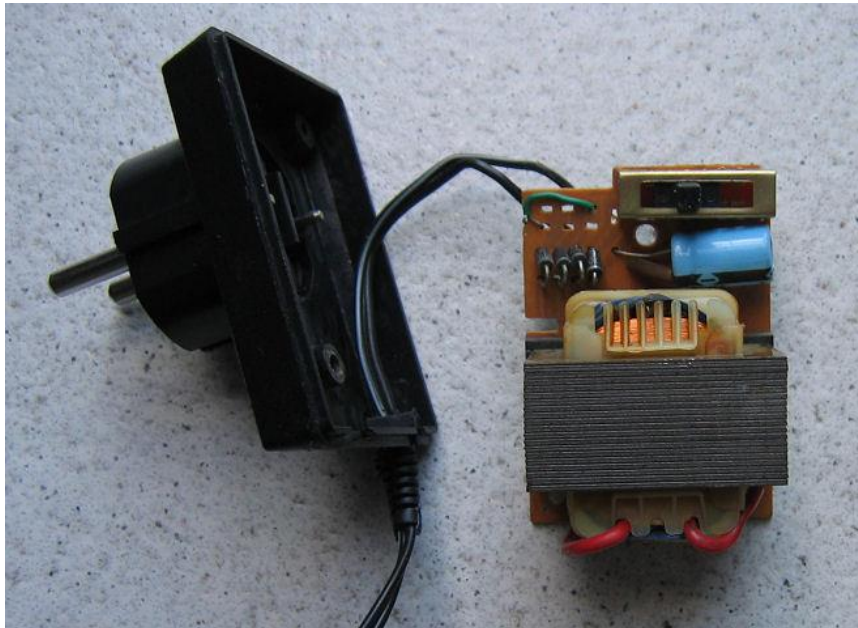


Abb.1: einfaches Netzgerät

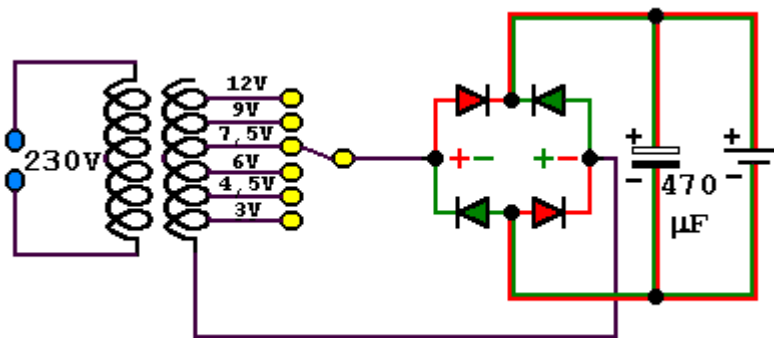


Abb.2: Schaltplan des Netzgerätes

4.2.2 Versuch

Durchführung:

Man wählt am Netzteil z.B. eine Ausgangsspannung von 7,5V und belastet es mit einem veränderlichen Widerstand von 100Ω bzw. $1k\Omega$ nach Abb.3.

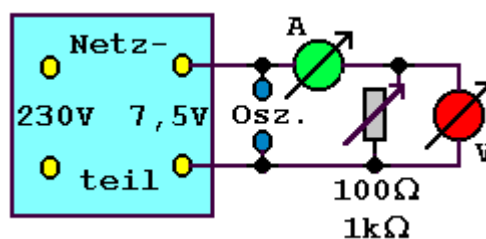


Abb.3: Versuchsaufbau

Beobachtung:

Man erhält für die Ausgangsspannung U , den Ausgangstrom I und die Welligkeit ΔU folgende Messtabelle:

U[V]	I[A]	ΔU [V]
12,5	0	0
11	0,05	0,8
10,5	0,1	1,6
9,8	0,15	2,5
9,2	0,2	2,8
8,5	0,3	3,8
7,7	0,4	4,4
7	0,5	4,8

Tabelle 1: belastetes Netzteil

Am Oszillographen beobachtet man die Kurven in Abb.4.

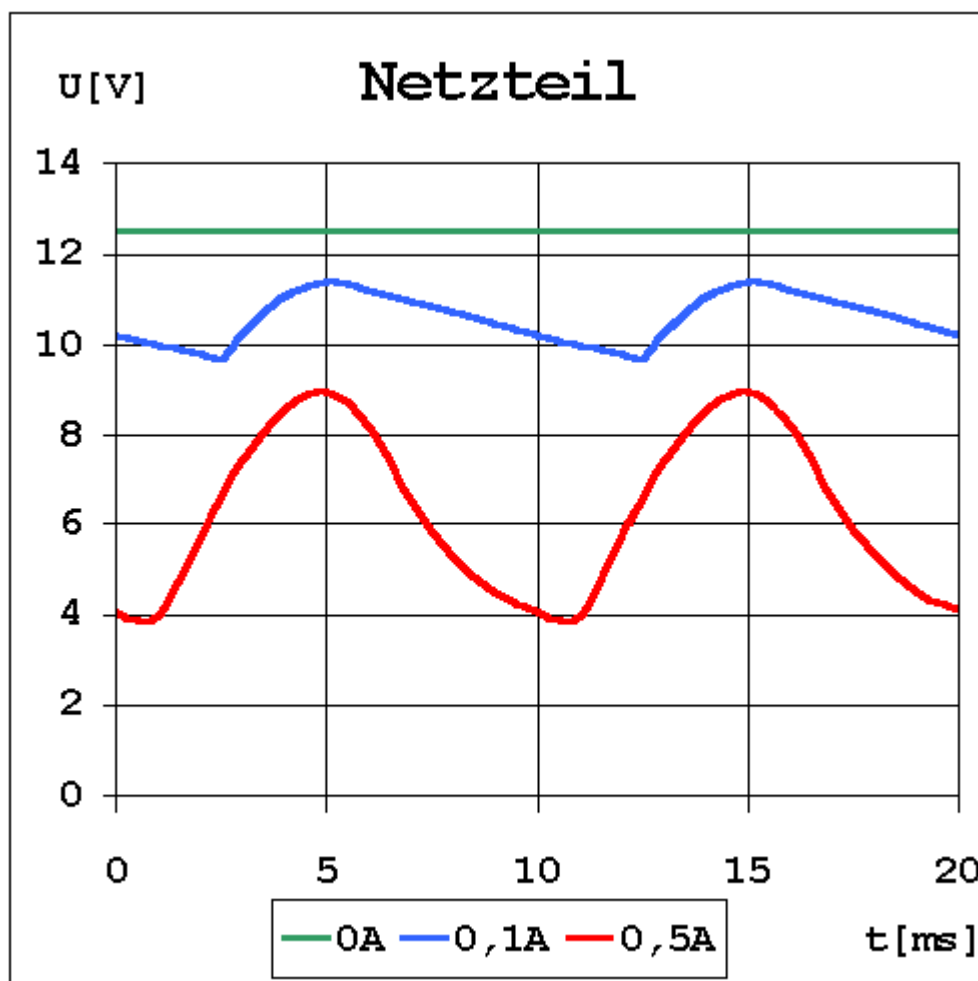


Abb.4: Oszillographenbild

Auswertung:

Man erkennt aus den Messwerten und der Abb.4, dass mit zunehmendem Strom I die Ausgangsspannung U sinkt und die Welligkeit ΔU , also die Schwankung der Ausgangsspannung, steigt. Die Welligkeit kommt dadurch zustande, dass die gleichgerichtete Wechselspannung Spannungslücken aufweist. Ist der momentane Wert der pulsierenden Gleichspannung groß genug, so liefert sie einerseits die Spannung zum Betrieb des angeschlossenen

Gerätes und lädt andererseits den Kondensator auf. In den Lücken der Spannung stellt der Kondensator den Strom für das elektronische Gerät bereit. Dadurch entlädt er sich ganz oder teilweise. Die Spannung an ihm sinkt. Ein Beispiel soll das verdeutlichen. Bei einer Belastung von 0,1A beträgt die Ladezeit für den Kondensator nach Abb.4 $t_1 = 2,5\text{ms}$, die Entladezeit $t_2 = 7,5\text{ms}$. In dieser Zeit gibt der Kondensator eine Ladung von

$$\begin{aligned} Q &= I \cdot t_2 \\ &= 0,1\text{A} \cdot 0,0075\text{s} \\ &= 0,00075\text{C} \\ &= 7,5 \cdot 10^{-4}\text{C} \end{aligned}$$

ab. Diese Ladung verursacht am Kondensator mit der Kapazität

$$C = 470\mu\text{F}$$

einen Spannungsabfall von

$$\begin{aligned} \Delta U &= Q/C \\ &= 7,5 \cdot 10^{-4}\text{C} / 4,7 \cdot 10^{-4}\text{F} \\ &= 1,6\text{V}. \end{aligned}$$

Dieser Wert stimmt sehr gut mit der gemessenen Welligkeit bei 0,1A überein. Aufgrund ihrer recht großen Welligkeit sind solche Netzteile nur für Beleuchtungszwecke oder Audiogeräte kleiner Leistung geeignet. Ansonsten macht sich die Welligkeit als unangenehmes Brummen mit einer Frequenz von 100 Hz bemerkbar. Mit einem Kondensator größerer Kapazität kann man die Welligkeit zwar verringern, jedoch nie ganz beseitigen, da er sich stets etwas entlädt. Will man sie ganz unterdrücken, so muss man dem Netzteil einen Festspannungsregler nachschalten, der dafür sorgt, dass die Ausgangsspannung unabhängig von der Belastung gleich bleibt, also weder sinkt noch schwankt.