

**Aus dem Innenleben
einer
elektrischen Zahnbürste**

A. Reichert

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1. Vorwort	3
2. Einleitung	4
3. Voruntersuchungen am geschlossenen Gehäuse	6
4. Untersuchung der Schaltungen	8
4.1 Untersuchungen am geöffneten Ladeteil	8
4.2 Untersuchungen an der geöffneten Bürste	16
5. Physik des Hochfrequenztrafos	18
6. Literaturverzeichnis	21

1. Vorwort

In einem Buch fand ich vor kurzem eine sehr treffende Karikatur¹⁾. Ein Physiklehrer steht vorne an seinem Pult, umgeben von allerlei Geräten aus der Physiksammlung. Die Schüler sitzen gelangweilt in ihren Bänken. Ihnen schwirren Handys, Airbags, Bewegungsmelder, Chipkarten und allerlei interessante Dinge durch den Kopf, von denen sie tagtäglich umgeben sind. Da wagt es doch der Lehrer, die vom wissenschaftlichen Standpunkt aus betrachtet sehr bedeutungsvolle Frage an die Schüler zu richten: Wie kann man μ_0 bestimmen? Und erntet bei seinen Schülern nur lähmendes Entsetzen und gähnende Langeweile. Sind wir Physiklehrer eigentlich wirklich so fern ab von der Realität und in unseren Schulen zu verknöcherten Faktoten verkommen? Oder sind wir einfach nur zu bequem, uns mit Fragen auseinander zu setzen, die unsere Schüler wirklich interessieren könnten? Laut Pisa-Studie scheint es fast so zu sein. Sicherlich liegt die Wahrheit irgendwo dazwischen und ist mit Sicherheit auch noch von Lehrer zu Lehrer verschieden. Physikunterricht kann sich jedenfalls nicht darin ergehen, die Geräte der Physiksammlung zu verstehen. Denn diese Geräte sind im Alltag für die Schüler zu neunundneunzig Prozent ohne Belang. Umso mehr sind wir als Physiklehrer gefordert, nach Objekten in der Lebenswelt der Schüler Ausschau zu halten, mit denen sich die vom Lehrplan geforderten Inhalte ebenso gut erarbeiten lassen, wie mit den Geräten der Sammlung. In diesem Sinne bleibt mir nur die Hoffnung, mit dem folgenden Skript vielleicht ein paar Kollegen wach rütteln zu können, ab und an mit ihrem Physikunterricht ein wenig näher an die Erfahrungswelt der Schüler heranzurücken.

Stolberg, im April 2002

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau für das Korrekturlesen.

2. Einleitung

Die Schüler sammeln ihre ersten Erfahrungen mit der Elektronik meist anhand einfacher Versuche mit speziellen Elektronikkästen. Ist die anfängliche Begeisterung verflogen, so vermissen sie meist den direkten Bezug zwischen ihren Schaltungen und dem Einsatz der Elektronik in der Praxis. Sie äußern daher oft den Wunsch, in einem zweiten Lernabschnitt käufliche elektronische Geräte zu untersuchen. Nun sind moderne elektronische Geräte meist sehr kompliziert aufgebaut. Außerdem enthalten sie in aller Regel integrierte Schaltungen, deren Funktion im Einzelnen nicht nachvollziehbar ist. Auf der Suche nach geeigneten Studienobjekten stieß ich durch Zufall auf die elektrische Zahnbürste von Blend-a-dent, Modell Master. Die Wahl erwies sich aus folgenden Gründen als sehr vorteilhaft:

1. Sie enthält insgesamt nur 20 elektronische Bauteile. Es handelt sich dabei ausschließlich um sehr gebräuchliche diskrete Bauelemente, deren Funktion den Schülern nach der Einführung in die Elektronik geläufig ist.
2. Die Schaltung lässt sich schon mit ca. 30 V Wechselspannung betreiben und nicht erst mit 230 V, so dass weitergehende Untersuchungen mit Oszillograph und Voltmeter gefahrlos möglich sind.
3. Die Zahnbürste ist auch vom physikalischen Standpunkt aus betrachtet äußerst interessant. In ihr wird ein sogenannter Hochfrequenztrafo zur Energieübertragung vom Ladeteil auf die Bürste benutzt. Dabei spielen weitergehende Überlegungen zum Trafo eine Rolle, die im normalen Unterricht beim Thema Transformator nicht behandelt werden.
4. Ferner lassen sich an ihr viele Gesetze, die zum Pflichtkanon in den Klassen 12 oder 13 gehören, an einem praktischen Beispiel anwenden, so etwa die Gesetze über die Reihen- und Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen, das Gesetz über die Entladung eines Kondensators, das Gesetz über die Reihenschaltung von Kondensatoren und die Thomsonsche Schwingungsformel. Daher eignet sich das Skript hervorragend, um am Ende der Klasse Q2 als Vorbereitung auf das Abitur viele Themen aus dem Bereich der Elektrizitätslehre zu wiederholen.
5. Selbst der Schwingkopf bietet eine Reihe beachtenswerter Ansatzpunkte für die Mechanik, auf die in diesem Skript jedoch nicht eingegangen wird.

Alles in allem stellt die Zahnbürste ein sehr lohnenswertes Studienobjekt dar, zumal heute fast jeder Schüler eine elektrische Zahnbürste von zuhause kennt.

Untersucht man die Modelle anderer Firmen, so kann man zwei Typen unterscheiden. Beim ersten steckt die Empfangsspule der Bürste in der Sendespule der Ladestation, beim zweiten ist es umgekehrt. Im ersten Fall hat die Sendespule eine große Querschnittsfläche und eine hohe Windungszahl. Es wird kein Eisen-

kern benötigt. Die Empfangsspule steckt in einer Tasche der Ladestation. Die Sendespule des zweiten Typs zeichnet sich durch ihre Kleinheit aus. Sie steckt im Haltepin der Bürste. Da sie weniger Windungen hat und außerdem ihre Querschnittsfläche sehr klein ist, enthält sie einen Eisenkern. Bei beiden ist aber die hohe Frequenz der entscheidende Faktor, um die benötigte Ladespannung für den Akku zu erzeugen. Die Höhe der Induktionsspannung ist nach dem Induktionsgesetz proportional zur Frequenz, zur Querschnittsfläche der Spule und zur magnetischen Feldstärke. Über alle drei Faktoren kann man die Änderung des magnetischen Flusses steuern, der nach dem Induktionsgesetz die Induktionsspannung erzeugt. Durch die Erhöhung der Netzfrequenz von 50 Hz auf 20-35 kHz steigt in der Empfangsspule die Induktionsspannung um den Faktor 400-700, mehr als man durch einen Eisenkern erreichen kann.

Die gleiche Technik wird in LED-Nachttischlampen verwendet, die einen Akku enthalten. Sie werden im Skript Nachtlcht auf dieser Webseite ausführlich untersucht.

In diesem Sinne wünsche ich allen, Schülern und Lehrern, viel Spaß beim Lesen des Skriptes und beim Experimentieren mit der Zahnbürste.

3. Voruntersuchungen am geschlossenen Gehäuse

Drei Vorversuche am geschlossenem Gehäuse verraten schon sehr viel über das Innere des Ladeteils, wenn man sich ein wenig mit Schwingkreisen auskennt²⁾.

Versuch 1a:

Durchführung:

Man stellt neben das Ladeteil eine Leybold-Spule mit $n = 1000$ Windungen und schließt sie an ein Voltmeter bzw. einen Oszillographen an. Der Oszillograph sollte zunächst wie folgt eingestellt sein: 2-5 V/cm; 10 ms/cm; AC. Dann verbindet man das Ladeteil mit der Steckdose. Anschließend dehnt man die Achse des Oszillographen auf 10 μ s/cm.

Beobachtung:

Das Voltmeter zeigt eine Spannung von z. B. $U_{\text{eff}} = 10$ V an. Auf dem Oszillographen sieht man eine ungedämpfte amplitudenmodulierte Hochfrequenzschwingung mit einer Amplitude z. B. zwischen 12 V und 15 V. Die Spannungen können auch erheblich größer oder kleiner als diese Werte sein. Sie hängen sehr stark vom Abstand Ladeteil Spule ab. Die Modulation erfolgt mit Netzfrequenz, also mit $f = 50$ Hz. Die Modulationsschwingung lässt sich aber nicht eindeutig einer bestimmten Form zuordnen. Sie kann mit einer einfachen Demodulationschaltung hörbar gemacht werden (**s. Versuch 1c**). Dehnt man die Zeitachse des Oszillographen, so erkennt man, dass die Frequenz der Hochfrequenz zwischen 30 kHz und 50 kHz liegt. Genauer lässt sich die Frequenz zunächst nicht bestimmen, da das Sinussignal doch sehr verzerrt ist.

Folgerung:

Die Energie wird bei der elektrischen Zahnbürste nicht mit Netzfrequenz, sondern mit einer sehr viel höheren Frequenz vom Ladeteil auf die Zahnbürste übertragen. Warum das so ist, erfahren Sie in Kapitel 5. Um einen möglichst genauen Wert für die Frequenz der Hochfrequenz zu erhalten, ersetzt man die Empfangsspule durch einen abstimmbaren Schwingkreis. Dazu führt man den folgenden Versuch durch.

Versuch 1b: (Lehrerversuch!!!)

Durchführung:

Man schaltet zur Empfangsspule aus Versuch 1a einen Festkondensator von 220 pF und einen Drehkondensator von 500 pF parallel. Dann stellt man den Drehkondensator so ein, dass die Spannung am Voltmeter ihren höchsten Wert erreicht. **Dabei ist höchste Vorsicht geboten, denn je nach Abstand zwischen Ladeteil und Spule kann die Spannung bis zu 1000 V betragen.** Danach zieht man den Stecker des Ladeteils aus der Steckdose, trennt die Kondensatoren und die Spule voneinander und misst mit einem Kapazitäts- bzw. Induktivitätsmessgerät die eingestellte Kapazität der Kondensatoren bzw. die Induktivität der Spule.

Beobachtung:

Das Kapazitätsmessgerät zeigt für den Resonanzfall einen Wert $C = 520 \text{ pF}$ und das Induktivitätsmessgerät einen Wert $L = 34,9 \text{ mH}$ an.

Folgerung:

Aus den gemessenen Werten für C und L errechnet sich die Frequenz des Schwingkreises nach der Thomsonschen Schwingungsformel zu

$$f = 1 / (2\pi * \text{sqr}(L * C)) = 37,4 \text{ kHz.}$$

Versuch 1c:

Die amplitudenmodulierte Schwingung, die man in Versuch 1a beobachtet, lässt sich mit folgender Schaltung demodulieren.⁴⁾

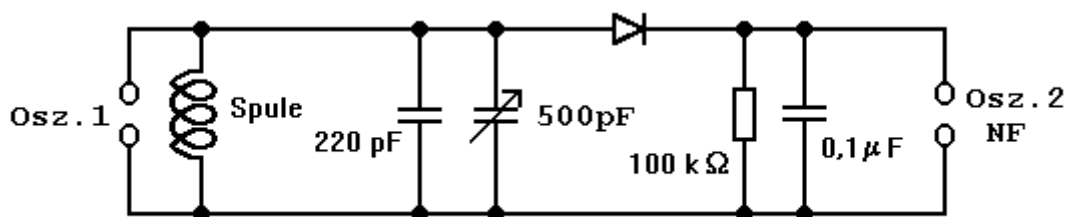


Abb. 3.1.1: Einfache Demodulationsschaltung

Durchführung:

Man legt den Oszillographen bei einer Zeitauflösung von $10 \mu\text{s/cm}$ zunächst nach Stellung Osz. 1 an den Empfangskreis. Mit Hilfe des Drehkondensators stellt man den Schwingkreis auf optimalen Empfang ein. Dann schließt man den Oszillographen gemäß Osz.2 an und dehnt die Zeitachse bis auf 10 ms/cm . Anschließend ersetzt man den Oszillographen am Empfangskreis durch einen NF-Verstärker mit Lautsprecher.

Beobachtung:

Auf dem Oszillographen beobachtet man in Stellung Osz.2 eine verzerrte Schwingung nicht genau bestimmbarer Form mit einer Frequenz $f = 50 \text{ Hz}$. Aus dem Lautsprecher ertönt ein lauter Brummtön.

Folgerung:

Aus den drei Versuchen folgt, dass das Ladeteil jedenfalls einen ungedämpften Hochfrequenzoszillator enthalten muss. Da für die Entdämpfung des Schwingkreises mindestens ein Transistor erforderlich ist und Transistoren Gleichspannung benötigen, muss dem Oszillator ein Gleichrichter vorgeschaltet sein. Dessen Gleichspannung ist offensichtlich nicht optimal geglättet, so dass der Hochfrequenzoszillator leicht amplitudenmoduliert wird. Dass die Frequenz $f = 50 \text{ Hz}$ und nicht $f = 100 \text{ Hz}$ beträgt, wird klar, wenn man den Gleichrichter genauer untersucht. Öffnet man das Gehäuse des Ladeteils, so findet man die Vermutungen voll bestätigt, wie im nächsten Kapitel genauer dargestellt wird.

4. Untersuchung der Schaltungen

4.1 Untersuchungen am geöffneten Ladeteil

Die Plastikgehäuse von Zahnbürste und Ladeteil lassen sich am einfachsten mit einer kleinen Säge öffnen. Dabei sollte man darauf achten, den Schnitt nicht zu tief anzusetzen, um die darunter liegenden Bauteile nicht zu beschädigen. Eine Analyse der Platine des Ladeteils liefert den Schaltplan in Abb. 4.1.1

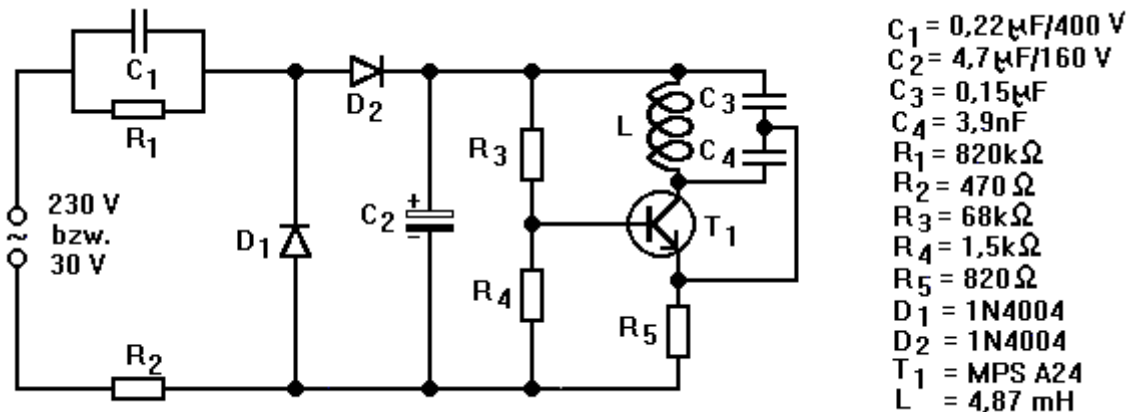


Abb. 4.1.1: Schaltplan Ladeteil

Die Schaltung besteht in der Tat aus zwei Teilen

- a) einem LC-Oszillator und
- b) einem Kaskadengleichrichter.

Sie soll mit den folgenden Versuchen genauer analysiert werden. Dabei kommen weitere sehr interessante Einzelheiten zutage. Für die Untersuchungen ist es sehr gefährlich, am offenen Gehäuse mit der Netzspannung von $U_{\text{eff}} = 230 \text{ V}$ zu arbeiten. Solche Untersuchungen dürfen nur von erfahrenen Experimentatoren und mit speziellen Abgreifklemmen vorgenommen werden. Erstaunlicherweise funktioniert die Schaltung jedoch auch schon bei einer Betriebsspannung von ca. $U_{\text{eff}} = 30 \text{ V}$ recht gut. Daher werden alle folgenden Versuche mit dieser Spannung durchgeführt. Zunächst wenden wir uns dem Oszillator zu. Er sollte aus den beiden Kondensatoren C_3 und C_4 und der Spule L bestehen. Der Transistor führt im durchgeschalteten Zustand dem Schwingkreis im Takte der Hochfrequenz Energie zu, um ihn zu entdämpfen. An seinem Emitterwiderstand R_5 kann man daher die Hochfrequenz abgreifen und auf ihre Frequenz überprüfen.

Versuch2:

Durchführung:

Man legt bei einer Betriebsspannung von ca. $U_{\text{eff}} = 30 \text{ V}$ die Spannung am Emitterwiderstand R_5 (s. Abb. 4.1.1) des Oszillators an einen Oszillographen. Er sollte zunächst wie folgt eingestellt sein: $10 \mu\text{s}/\text{cm}$; $0,2 \text{ V}/\text{cm}$; AC. Danach staucht man die Zeitachse um den Faktor 1000 auf $10 \text{ ms}/\text{cm}$. Dann schließt

man den Kondensator C_2 an den Oszillographen an bei folgender Einstellung: 10 ms/cm; 5 V/cm; DC.

Beobachtung:

Auf dem Oszillographenschirm sieht man eine ungedämpfte Sinuskurve mit einer Periodendauer $T = 27,5 \mu\text{s}$. Die Schwingung ist leicht verschmiert. Bei gestauchter Zeitachse beobachtet man auf dem Oszillographen das typische Bild einer amplitudenmodulierten Schwingung. Die Modulation ist dreieck- bis sägezahnförmig. Am Kondensator C_2 erhält man eine Gleichspannung, die dreieckförmig bis sägezahnförmig pulsiert. Ihre Amplitude schwankt zwischen 7,5 V und 10 V.

Auswertung:

Aus der Periodendauer T erhält man nach der Formel

$$f = 1/T$$

eine Frequenz $f = 36,4 \text{ kHz}$. Die Amplitudenmodulation der Sinuskurve rührt offensichtlich von der Betriebsspannung des Transistors her, die nicht optimal geglättet ist. Dass diese Deutung richtig ist, zeigt der Spannungsverlauf am Kondensator C_2 . Er dient als Glättungskondensator des Gleichrichters und damit als Spannungsquelle für den Transistor. Die Kondensatoren C_3 und C_4 (s. Abb. 4.1.1) tragen die Aufschriften $C_3 = 0,15 \mu\text{F}$ und $C_4 = 3,9 \text{ nF}$. Daraus errechnet man mit Hilfe des Gesetzes für die Reihenschaltung von Kondensatoren

$$1/C_{\text{ges}} = 1/C_1 + 1/C_2$$

eine Gesamtkapazität $C_{\text{ges}} = 3,8 \text{ nF}$. Ein Induktivitätsmessgerät zeigt für die Spule eine Induktivität $L = 4,87 \text{ mH}$ an. Die Thomsonsche Schwingungsformel liefert für die Frequenz somit

$$f = 1/T = 1/(2\pi \cdot \text{sqr}(L \cdot C_{\text{ges}})) = 37 \text{ kHz},$$

in guter Übereinstimmung mit dem Messwert und dem Wert aus dem Vorversuch 1b.

Der Oszillator funktioniert wie folgt: Beim Einschalten werden die Kondensatoren C_3 und C_4 durch den Kollektorstrom des Transistors aufgeladen. Sie bilden einen kapazitiven Spannungsteiler. Der Schwingkreis wird dabei angestoßen und beginnt zu schwingen. Um Energieverluste auszugleichen und ein Abschwächen der Schwingung zu verhindern, wird ein Teil der Spannung im Schwingkreis auf den Emitter zurückgeführt. Dadurch wird der Transistor im Takte der Hochfrequenz ein- und ausgeschaltet. Im leitenden Zustand versorgt er den Schwingkreis mit neuer Energie, um die Energieverluste an die Bürste aufgrund der induktiven Kopplung auszugleichen. Die Schaltung ähnelt der geläufigen Dreipunktschaltung, die man für ungedämpfte Schwingungen im Radiobereich benutzt. Nur wird dort die Spannung meist durch einen zusätzlichen Abgriff an der Spule auf die Basis des Transistors rückgekoppelt. Aber auch bei Radio-

sendern ist eine kapazitative Rückkopplung möglich. Entscheidend für das Durchschalten des Transistors ist ja die Spannung zwischen der Basis und dem Emitter. Und die kann man ändern, indem man das Potential der Basis oder des Emitters anhebt bzw. absenkt. Der Transistor ist ein japanischer Typ, der in etwa vergleichbar ist mit dem Hochfrequenztransistor BF 459. Auf die Frage, warum die Energie vom Ladeteil auf die Bürste mit einem hochfrequenten Wechselfeld übertragen wird, werde ich in Kapitel 5 näher eingehen. Wenden wir uns als nächstes dem Gleichrichter zu.

Versuch3: (s.a. Versuch 2)

Durchführung:

Man greift mit einem Gleichspannungsvoltmeter bei einer Betriebsspannung von ca. $U_{\text{eff}} = 30 \text{ V}$ bzw. $U_{\text{eff}} = 230 \text{ V}$ (**Vorsicht beim Messen!! s.o.**) die Spannung am Kondensator C_2 (s. Abb.4.1.1) ab.

Beobachtung:

Man erhält eine Gleichspannung von ca. $U = 10 \text{ V}$ bzw. $U = 70 \text{ V}$.

Folgerung:

Laut Literatur hätten die Spannungen für einen Kaskadengleichrichter weit größer sein müssen. Sie müssten eigentlich der doppelten Amplitude der angelegten Wechselspannung, also

$$U = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}} = 2,83 \cdot 30 \text{ V} = 85 \text{ V} \text{ bzw.}$$

$$U = 2,83 \cdot 230 \text{ V} = 650 \text{ V}$$

entsprechen. Damit wird zumindest verständlich, warum der Kondensator C_2 nur für eine Spannung von 160 V ausgelegt ist (s. Abb.4.1.1). Es bleibt die Frage, warum die Spannung so niedrig ist. Zunächst liegt die Vermutung nahe, der Widerstand R_1 könnte dafür verantwortlich sein. Er fehlt nämlich normalerweise in einem Kaskadengleichrichter. Die Antwort lässt sich mit dem folgenden Versuch finden.

Versuch 4:

Durchführung:

Man schaltet zu R_1 einen Widerstand von z.B. $R = 100 \text{ k}\Omega$ bzw. einen Kondensator von z.B. $C = 1 \mu\text{F}$ parallel.

Beobachtung:

Durch den zusätzlichen Widerstand ändert sich die Spannung an C_2 nicht, durch den zusätzlichen Kondensator steigt sie auf ca. 30 V.

Folgerung:

Der Widerstand erfüllt offensichtlich noch einen andern Zweck, worauf ich weiter unten noch einmal eingehen werde. Die Ausgangsspannung an C_2 hängt vielmehr vom Verhältnis C_1/C_2 ab. Um die Verhältnisse am Kaskadengleichrichter genauer zu untersuchen, bauen die Schüler mit Elektronikkästen die Schaltung nach Abb. 4.1.2 auf.

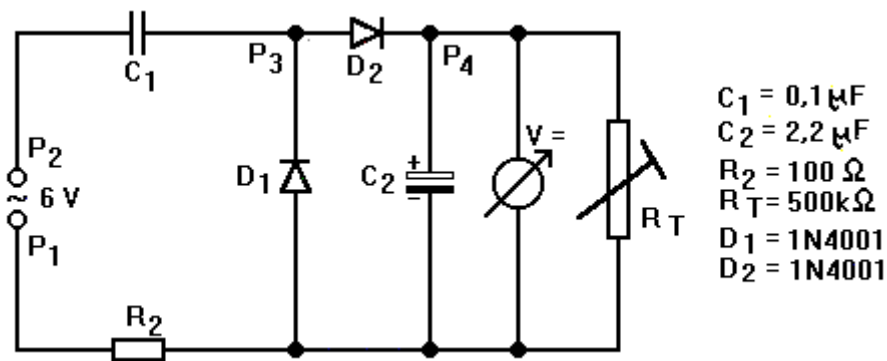


Abb. 4.1.2: Schaltpläne für die Schülerversuche

Versuch 5:

Durchführung:

Für die folgenden Versuche stellt man zunächst das Potentiometer so ein, dass das Voltmeter eine Spannung anzeigt, die in etwa der Amplitude der angelegten Wechselspannung entspricht, im Beispiel also ca. $U = 8 \text{ V}$.

Versuch 5a:

Durchführung:

Die Schüler schalten zum Kondensator C_1 einen zweiten Kondensator mit $C = 2,2 \mu\text{F}$ parallel.

Beobachtung:

Die Spannung am Voltmeter steigt von 8 V auf 15 V .

Versuch 5b:

Durchführung:

Die Schüler legen zu C_2 einen Kondensator $C = 10 \mu\text{F}$ parallel.

Beobachtung:

Die Spannung sinkt vorübergehend von 8 V auf 3 V , erreicht aber nach kurzer Zeit wieder ihren Endwert 8 V .

Versuch 5c:

Durchführung:

Man ersetzt das Voltmeter durch einen Oszillographen und stellt ihn wie folgt ein: 5 V/cm ; DC; 10 ms/cm . Dann tauscht man C_2 gegen einen Kondensator mit $C = 0,1 \mu\text{F}$ aus.

Beobachtung:

Die Gleichspannung ist beim Kondensator $C = 0,1 \mu\text{F}$ weit weniger gut geglättet, der Spitzenwert der Spannung bleibt jedoch gleich.

Versuch 5d:

Durchführung:

In der Schaltung nach Abb. 4.1.2 variieren die Schüler die Stellung des Potentiometers.

Beobachtung:

Wird der Widerstand kleiner, so sinkt auch die Spannung.

Versuch 5e:

Durchführung:

In der Schaltung nach Abb. 4.1.2 entfernt man das Potentiometer. Dann schaltet man einen Kondensator $C = 2,2 \mu\text{F}$ parallel zu C_1 .

Beobachtung:

Die Spannung steigt beim Entfernen des Potentiometers von 8 V auf ca. 14 V. Nach dem Parallelschalten des Kondensators erreicht sie sogar 17 V.

Folgerungen aus den Versuchen:

Aus den Versuchen 5a - 5e ergeben sich folgende qualitative Zusammenhänge:

- 1) Die abnehmbare Gleichspannung ist um so größer, je größer die Kapazität von C_1 ist. Sie hängt nicht von C_2 ab.
- 2) Die Glättung der Gleichspannung ist um so besser, je größer die Kapazität des Kondensators C_2 ist.
- 3) Die abnehmbare Gleichspannung eines Kaskadengleichrichters ist um so größer, je größer der Lastwiderstand, je kleiner also seine Belastung ist. Im völlig unbelasteten Zustand fällt unter der Bedingung $C_1 > C_2$ an C_2 eine Spannung ab, die doppelt so groß ist wie die Amplitude der angelegten Wechselspannung.

Funktion des Kaskadengleichrichters:

Bei der folgenden Erklärung werden die Durchlassspannungen der beiden Dioden nicht berücksichtigt, da sie gering sind. Angenommen, der untere Pol in Abb. 4.1.2 ist mit dem Nulleiter verbunden. Er liegt somit auf Erdpotential P_1 . In der negativen Halbwelle sinkt P_2 unter das Erdpotential und zieht P_3 mit. Die Diode D_1 schaltet durch. P_3 erlangt schlagartig Erdpotential. Da das Potential von P_2 bis auf die maximale negative Elongation der Wechselspannung weiterfällt, lädt sich C_1 auf die Amplitude der Wechselspannung auf. Nun beginnt P_2 zu steigen und hebt das Potential P_3 in den positiven Bereich, da gilt:

$$P_3 = P_2 + U(C_1).$$

Diode D_1 sperrt, Diode D_2 schaltet durch. Das Potential P_4 wird mitgezogen. Daher fließen von P_3 , also von der rechten Seite von C_1 Ladungen über den Lastwiderstand ab; gleichzeitig laden sie C_2 auf. Daher kann C_2 in der Sperrphase von D_2 den Strom durch den Lastwiderstand zumindest teilweise aufrechterhalten. Jedenfalls sinken durch den Ladungsverlust die Spannung $U(C_1)$ und infolgedessen auch die Potentiale P_3 und P_4 . Erreicht P_2 maximales positives Potential, so liegen P_3 und P_4 auf einem Potential, das der Summe aus der Amplitude der Wechselspannung und der verbleibenden Spannung an C_1 entspricht. Die Spannung an C_1 kann je nach abgeflossener Ladungsmenge auch negative Werte annehmen, da der Kondensator während der Durchlassphase

von D_2 teilweise oder ganz umgeladen worden sein kann. Sind keine Ladungen über den Lastwiderstand abgezogen worden, so entsprechen die Potentiale P_3 und P_4 der doppelten Amplitude der angelegten Wechselspannung. Sinkt P_2 wieder, so folgt ihm zunächst P_3 . P_4 jedoch behält seinen Wert, da C_2 geladen ist und die Diode D_2 augenblicklich sperrt. Unterschreitet P_3 das Erdpotential, so öffnet sich D_1 , P_3 erlangt Erdpotential und der ganze Vorgang beginnt von vorn. Man kann den Kaskadengleichrichter also quasi als Ladungspumpe ansehen. Sie pumpt Ladung von einem tieferen Potential, das im Mittel dem Erdpotential entspricht, auf ein höheres Potential, das im Idealfall im Mittel die Amplitude der Wechselspannung erreicht. Dass diese Deutung richtig ist, beweist der folgende Versuch.

Versuch 6:

Durchführung:

Man stellt in der Schaltung nach Abb. 4.1.2 das Potentiometer so ein, dass die Spannung am Voltmeter etwa 5 V beträgt. Dann überprüft man mit einem Oszillographen nacheinander die Spannungen an D_1 , D_2 und C_1 . Beachten Sie dazu die Polung des Oszillographen in Abb. 4.1.3 und die folgenden Einstellungen am Oszilloskop: 5V/cm; 10 ms/cm und DC. Anschließend verändert man die Stellung des Potentiometers.

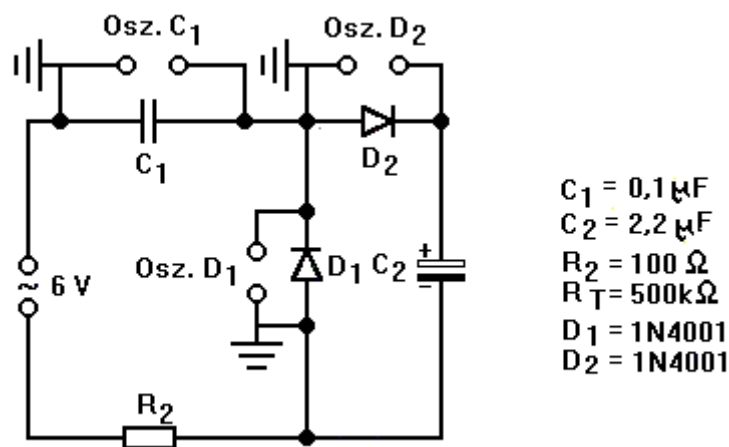


Abb. 4.1.3: Erdung des Oszillographen

Beobachtung:

Man erhält am Oszillographen die Kurven in Abb. 4.1.4.

Folgerung:

Deutlich erkennt man, dass die beiden Dioden wechselseitig sperren und durchschalten. Außerdem bestätigt der Kurvenverlauf an C_1 das oben Gesagte. Erwähnenswert ist noch, dass mit steigendem Lastwiderstand der Umkehrpunkt der negativen Halbwelle ansteigt und sogar in den positiven Bereich gelangt, da sich der Kondensator C_1 dann bei geöffneter Diode D_2 kaum noch entlädt. Der Maximalwert des positiven Astes hingegen bleibt stets auf dem gleichen Niveau. Im unbelasteten Zustand nähert

sich daher unter der Zusatzbedingung $C_1 > C_2$ der Kurvenverlauf einer Geraden, deren Abstand zum Nullpunkt dem Wert der Amplitude der Wechselspannung entspricht. Gleichzeitig steigt der Maximalwert der Amplitude der pulsierenden Gleichspannung an den Dioden auf den doppelten Wert der Amplitude der angelegten Wechselspannung.

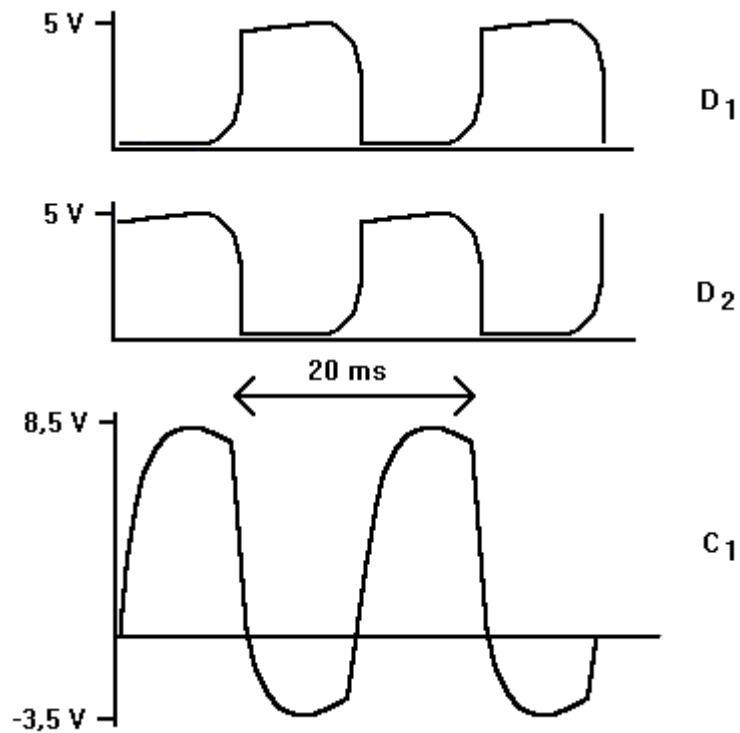


Abb. 4.1.4: Oszillographenbilder

Bleibt nur noch eine Frage offen, nämlich die Frage, welche Bedeutung der Widerstand R_1 in Abb. 4.1.1 hat. Dazu bietet sich ein **nicht ungefährlicher**, aber sehr aufschlussreicher **Lehrerversuch** oder aber ein ungefährlicher Schülerversuch an.

Versuch 7: (Lehrerversuch, sehr gefährlich)

Durchführung:

Man lötet in der Schaltung des Ladeteils nach Abb. 4.1.1 den Widerstand R_1 heraus, legt die Schaltung für kurze Zeit berührungssicher an Netzspannung von 230 V und zieht danach den Netzstecker. Dann schließt man über eine Glimmlampe die Pole des Steckers kurz. Man muss dabei unbedingt vermeiden, **die Enden des Steckers vor dem Entladen zu berühren, da sie auf mehr als 300 V (!!!) aufgeladen sein können**. Danach wiederholt man den Versuch mit eingelötetem Widerstand R_1 .

Beobachtung:

Ohne Widerstand R_1 leuchtet die Glimmlampe hell auf, mit Widerstand R_1 dagegen nicht.

Folgerung:

Der Widerstand R_1 soll den Kondensator C_1 nach dem Ziehen des Netzsteckers entladen. Da das eine Ende des Kondensators direkt mit einem Pol des Steckers verbunden ist, wäre sonst je nach Phasenlage der Wechselspannung beim Ziehen des Steckers auch dieser Stift auf über 300 V gegen Erde geladen, was lebensgefährlich sein könnte. Bei einer Zeitkonstante

$$\tau = R_1 \cdot C_1 = 0,81 \text{ s}$$

gelingt die Entladung innerhalb einer Sekunde auf ungefährliche

$$U(t) = U_0 \cdot \exp(-t/\tau) = 325\text{V} \cdot \exp(-5.56) = 1,3 \text{ V.}$$

Dabei entspricht U_0 der Amplitude der Netzspannung. Für sie gilt nämlich bei sinusförmigem Verlauf

$$U_0 = \sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}} = 325 \text{ V.}$$

Andererseits beeinflusst der Widerstand R_1 den Ladevorgang des Kondensators praktisch nicht, da er

- 1) sehr viel kleiner ist als der Ladewiderstand $R_2 = 470 \text{ } \Omega$ und
- 2) kaum zur Impedanz des RC-Gliedes beiträgt.

Das beweist die folgende kleine Rechnung. Für die Impedanz gilt:

$$Z = 1/\sqrt{1/R^2 + 1/R_C^2}.$$

Mit

$$R = 820 \text{ k}\Omega \text{ und}$$

$$R_C = 1/(\omega \cdot C) = 1/(2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 0,22\mu\text{F}) = 14,5 \text{ k}\Omega$$

folgt:

$$Z = 14,5 \text{ k}\Omega.$$

Die Aufgabe von R_1 lässt sich auch mit den Elektronikkästen der Schüler gefahrlos demonstrieren.

Versuch 8:

Durchführung:

Die Schüler entfernen aus der Schaltung nach Abb. 4.1.2 das Voltmeter, stellen das Potentiometer auf 500 k Ω ein, betreiben sie kurz mit 6 V und schalten die Betriebsspannung dann aus. Danach schließen sie an C_1 ein Voltmeter an. Dann legen sie zum Kondensator C_1 einen Widerstand $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ parallel und wiederholen den Versuch.

Beobachtung:

Ohne parallel geschalteten Widerstand zeigt das Voltmeter einen kurzen Spannungstoß an, mit Widerstand dagegen nicht.

Folgerung:

Auch bei diesem Versuch entlädt der parallel geschaltete Widerstand den Kondensator nach dem Abtrennen der Betriebsspannung. Im nächsten Kapitel beschäftigen wir uns mit der Elektronik der Bürste.

4.2 Untersuchungen an der geöffneten Bürste

Eine Analyse der Platine der Bürste liefert den Schaltplan in Abb.4.2.1

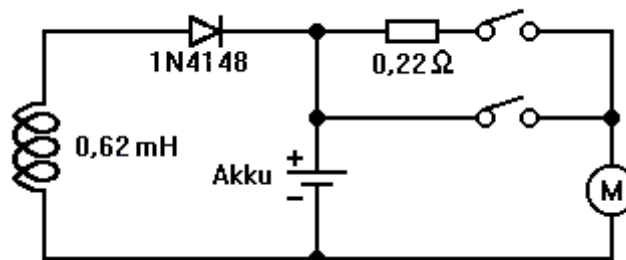


Abb.4.2.1: Schaltplan Bürste

Daraus geht hervor, dass die Bürste weit weniger kompliziert verschaltet ist als das Ladeteil. Ihre Funktion können die Schüler daher ohne Probleme selbst erarbeiten. Die wesentlichen Punkte lassen sich wie folgt kurz zusammenfassen:

Die in der Spule induzierte Spannung von ca. 2,3 V wird über die Diode gleichgerichtet. Der Gleichrichter ist so gepolt, dass der Akku zwar über ihn geladen werden kann, sich jedoch nicht über die Spule wieder entladen kann.

Der Akku ist für 1,2 V ausgelegt. Im Schnelllauf liegen sie voll am Motor der Bürste an. Schaltet man die langsame Stufe ein, so sinkt die Spannung am Motor aufgrund des Vorwiderstandes auf 1V.

Somit gelten folgende Beziehungen:

$$1,2 \text{ V} = R_M \cdot I_1$$

$$1 \text{ V} = R_M \cdot I_2 \text{ und}$$

$$0,2 \text{ V} = 0,22 \Omega \cdot I_2.$$

Darin bedeuten:

I_1 : Stromstärke im Schnelllauf,

I_2 : Stromstärke im Langsamlauf und

R_M : Widerstand des Motors.

Aus diesen Gleichungen folgt:

$$I_1 = 1,1 \text{ A}$$

$$I_2 = 0,91 \text{ A}$$

$$R_M = 1,1 \Omega$$

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = 1,32 \text{ W und}$$

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = 0,91 \text{ W,}$$

wobei P_1 und P_2 die Leistungen im Schnell- bzw. Langsamlauf sind.

Die Stromstärken lassen sich nur mit einem Amperemeter mit sehr kleinem Innenwiderstand nachmessen. Den Ohmschen Widerstand des Motors kann man nicht mit einem handelsüblichen Ohmmeter überprüfen, da er aus einer Spule besteht, die auch einen induktiven Widerstand besitzt. Bei den meisten modernen Ohmmetern wird der Messspannung eine Wechselspannung überlagert. Daher erhält man mit ihnen aufgrund der Induktivität der Spule einen falschen Wert für den Ohmschen Widerstand der Spule. Dass die Werte dennoch richtig sein müssen, zeigt ein Blick in die Bedienungsanleitung der Zahnbürste³⁾. Dort steht:

Schwingzahl Bürstenkopf

Geschwindigkeitsstufe 1: ca. 1700 Schwingungen/Minute

Geschwindigkeitsstufe 2: ca. 2500 Schwingungen/Minute.

Da bei Gleichstrommotoren bei konstanter mechanischer Belastung und vernachlässigbaren Wärmeverlusten in den Wicklungen die Drehzahl proportional zur zugeführten elektrischen Leistung ist, müsste das Verhältnis der beiden Drehzahlen n_1 und n_2 gleich dem Verhältnis der beiden errechneten Leistungen P_1 und P_2 sein.

Es gilt:

$$n_1/n_2 = 1700/2500 = 0,68 \text{ und}$$

$$P_1/P_2 = 0,91/1,32 = 0,69.$$

Beide Quotienten stimmen sehr gut überein.

5. Physik des Hochfrequenztrafos

Wäre zum Schluss noch die Frage zu klären, warum der Transformator mit einer für Wechselstrom sehr hohen Frequenz von $f = 37 \text{ kHz}$ und nicht mit der Netzfrequenz von $f = 50 \text{ Hz}$ arbeitet. Auf den ersten Blick kann man dafür rein praktische Gründe anführen. Die Spulen des Transformators sollten möglichst klein sein, damit die Zahnbürste und das Ladeteil nicht zu unhandlich und zu schwer werden. Aus diesem Grunde scheidet auch ein Eisenkern aus. Dann könnte man aber einfach einen Transformator mit sehr kleinen Spulen für Netzfrequenz bauen. Das aber hätte zur Folge, dass die Induktivität der Spulen, ihr Ohmscher Widerstand und ihre Impedanz sehr klein würden. Es würde also ein großer Blindstrom durch die beiden Spulen fließen. Erhöht man jedoch die Frequenz der Wechselspannung, so steigen der induktive Widerstand R_L und die Impedanz Z der Spulen, da gilt:

$$R_L = \omega \cdot L \text{ und}$$

$$Z = \text{sqr}(R^2 + R_L^2).$$

Der Ohmsche Widerstand ändert sich dadurch nicht, da er unabhängig von der Frequenz ist. Dabei muss man die Frequenz so wählen, dass der Transformator nur soviel Leistung überträgt, dass der Akku mit einer geeigneten Stromstärke geladen wird. Denn Akkus können bei zu schnellem Laden Schaden nehmen. Dass diese Deutung richtig ist, beweist der folgende Versuch.

Versuch 9:

Durchführung:

Man baut die Schaltung nach Abb. 5.1 auf.

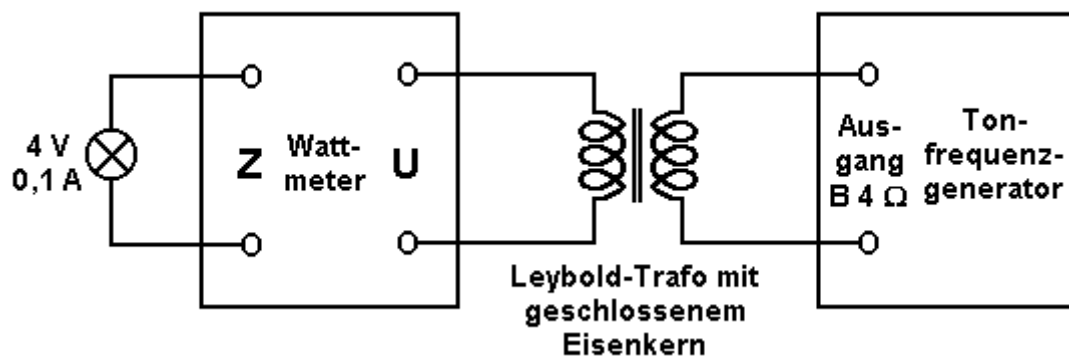


Abb.5.1: Hochfrequenztransformator

Sie besteht aus einem Transformator mit Spulen der Fa. Leybold. Auf der Primärseite wird über den Tonfrequenzgenerator der Fa. Phywe (Bestell-Nr. 11743.93) eine Wechselspannung veränderlicher Frequenz eingespeist. An die Sekundärseite wurde

das Leistungsmessgerät der Fa. Leybold (Bestell-Nr. LH 53183) angeschlossen. Als Last dient eine kleine Glühlampe mit den Kenndaten 4 V/0,1 A. Man stellt nun bei verschiedenen Windungszahlen der beiden Spulen die Frequenz am Tonfrequenzgenerator so ein, dass die übertragene Leistung gerade $P = 0,1 \text{ W}$ beträgt.

Ergebnis:

Man erhält die folgende Messtabelle:

n_p/n_s	250/250	500/500	1000/1000	1000/500	1000/250
$f [\text{Hz}]$	400	100	22	33	-

n_p/n_s	500/250	500/1000	250/1000	250/500
$f [\text{Hz}]$	150	55	110	220

Darin ist f die Frequenz der Wechselspannung, n_p die Windungszahl der Primärseite und n_s die Windungszahl der Sekundärseite.

Folgerung:

Je kleiner die Windungszahlen n sind, umso größer muss man die Frequenz wählen, damit die übertragene Leistung einen Wert von z. B. $P = 0,1 \text{ W}$ nicht übersteigt. Außerdem sieht man, dass offensichtlich der induktive Widerstand der Primär- und Sekundärspule für die übertragene Leistung von entscheidender Bedeutung ist. Für ihn gilt:

$$R_L = \omega * L = 2\pi * f * L.$$

Andererseits nimmt die Induktivität nach der Formel

$$L = \mu_0 * \mu_r * n^2 * A / l$$

mit dem Quadrat der Windungszahlen zu. Darin ist A die Querschnittsfläche der Spule, n die Windungszahl, l die Länge, μ_0 die magnetische Feldkonstante und μ_r die Permeabilitätszahl des verwendeten Eisenkerns. Halbiert man nämlich im Versuch die Windungszahlen der Primär- und Sekundärspule (s. Werte 1 - 3 der Tabelle), so sinkt ihre Induktivität L und somit ihr induktiver Widerstand R_L auf ein Viertel des ursprünglichen Wertes. Damit der induktive Widerstand wieder seinen Anfangswert erhält, muss man im Gegenzug die Frequenz f in etwa vervierfachen, um die übertragene Leistung näherungsweise konstant zu halten. Bei ungleichen Windungszahlen der Primär- und Sekundärspule werden die Verhältnisse etwas komplizierter, da Primär- und Sekundärstrom nach dem Transformatorengesetz

$$I_p / I_s = n_s / n_p$$

dann nicht mehr gleich sind. Das hat aber auch zur Folge, dass sich aufgrund der Hysterese μ_r und damit L zusätzlich ändert. In jeden Fall muss man aber auch dann bei sinkender Windungszahl

der Primärspule bzw. Sekundärspule die Frequenz erhöhen, um die Leistung zu begrenzen (s. Werte 4, 6-9 der Tabelle). Interessant ist noch das Ergebnis von Versuch 5 in der Tabelle. Bei dieser Kombination der beiden Windungszahlen lässt sich bei keiner Frequenz auf der Sekundärseite eine Leistung von $P = 0,1 \text{ W}$ erzielen. Sie ist in jedem Fall kleiner. Offensichtlich ist die übertragene Spannung U_s gemäß dem Transformatoren-gesetz

$$U_s = U_p \cdot n_s / n_p$$

dann so gering, dass der Strom I_s nach der Formel

$$I_s = P / U_s$$

sehr groß werden muss. Dadurch steigen die Verluste im Transformator offenbar sehr stark an. Möglicherweise erreicht der Eisenkern bei der erforderlichen Stromstärke auch bereits den Sättigungsbereich der Hystereseschleife.

6. Literaturverzeichnis

- 1) B. Eckert, W. Stetzenbach, H.-J. Jodl: Low Cost-High Tech, Freihandversuche Physik Aulis Verlag Deubner, Köln 2001
- 2) W. Reusch: Hochfrequenz- und Resonanztransformator - Kontaktloser Energietransport bei der elektrischen Zahnbürste, PdN Physik Heft 3/49 April 2000, Aulis Verlag Deubner, Köln 2000
- 3) Bedienungsanleitung blend a dent, Modell Master, Blendax Kundendienst Mainz
- 4) A. Reichert www.chemiephysikskripte.de/radiost.htm, Skript zum Thema Radiosender/Radioempfänger