

Aus dem Innenleben einer elektrischen Zahnbürste

Alfons Reichert



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1.Vorwort	3
2.Einleitung	4
3.Voruntersuchungen	6
4.Schaltungen	11
4.1 Ladeteil	11
4.2 Bürste	27
5.Zahnbürstenradio	31
6. Hochfrequenztrafo	38
7. Literaturverzeichnis	40

1. Vorwort

In einem Buch fand ich 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, Smartphones, Airbags, Bewegungsmelder, Chipkarten und allerlei interessante Dinge durch den Kopf, von denen sie tagtäglich umgeben sind. Da wagt es der Lehrer, die vom wissenschaftlichen Standpunkt aus betrachtet sehr bedeutungsvolle Frage an die Schüler zu richten: Wie bestimmt man μ_0 ? 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 Faktoren 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 von Lehrer zu Lehrer verschieden. Physikunterricht kann sich jedenfalls nicht darin ergehen, die Geräte der Physiksammlung oder die riesigen Apparaturen der Grundlagenforschung zu verstehen. Denn diese Geräte sind im Alltag für die Schüler zu neunundneunzig Prozent ohne Belang. Wer betreibt in seinem Garten schon einen Teilchenbeschleuniger oder in seinem Zimmer ein Rastertunnelmikroskop? 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 zu rütteln, ab und an mit ihrem Physikunterricht ein wenig näher an die Erfahrungswelt der Schüler heranzurücken, zumal die hier vorgestellte Technik inzwischen Eingang in andere Geräte aus der Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler gefunden hat wie kabellose Ladegeräte für Smartphones oder LED-Taschen- und Nachttischlampen. Auch die im Körper eingepflanzten Akkus für künstliche Herzen werden durch die Bauchdecke mit einer Spule induktiv nachgeladen. Und der Antrieb für Fahrzeuge mit Hilfe von EM-Wellen, die von riesigen Sendetürmen abgestrahlt werden, wird immer wieder aufs Neue vorgeschlagen, etwa von Nicola Tesla für Schiffe oder Freeman Dyson für Raumschiffe. Sie müssten ihren Treibstoff dann nicht mitschleppen, der bei Raumschiffen einen Großteil der Last ausmacht. Dass so etwas im Prinzip funktionieren könnte, zeigt uns die Sonne, die die Erde seit Milliarden von Jahren durch EM-Wellen kabellos mit Energie versorgt. Der sichtbare Frequenzbereich ihrer Strahlung, das Licht, lässt sich mit Solarzellen auch für den Antrieb von Fahrzeugen nutzen.

Statt Energie kann man mit EM-Wellen auch Informationen übertragen. Dazu moduliert man eine Trägerfrequenz, die von einem Oszillator erzeugt wird, mit Ton- oder Bildsignalen. Der Oszillator sendet elektromagnetische Wellen aus, die per Funk oder Kabel zum Empfänger gelangen. Dort regen sie einen Resonanzkreis zu Schwingungen an. Diese werden gleichgerichtet und anschließend von der Trägerfrequenz befreit. Die zurückgewonnenen Ton- bzw. Bildsignale werden verstärkt und über einen Lautsprecher hörbar bzw. einen Bildschirm sichtbar gemacht. Auch die Grundlagen dieser Vorgänge werden im Skript diskutiert und in Versuchen vorgestellt.

Stolberg, im April 2002 und im März 2021

2. Einleitung

Die Schüler sammeln ihre ersten Erfahrungen mit der Elektronik meist anhand einfacher Versuche mit speziellen Elektronikkästen. Ist die anfängliche Begeisterung verfliegen, so vermischen 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 mit wenigen Bauteilen nachbauen, die in jedem besseren Elektronikkasten vorhanden sind. Mit ein paar kleinen Anpassungen kann man sie mit einer Spannung von $U = 20\text{ V}$ betreiben, mit der auch Schüler experimentieren dürfen.
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 zu diesem Thema 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, das Induktionsgesetz 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 die meisten Schülerinnen und Schüler eine elektrische Zahnbürste von zuhause kennen.

Untersucht man die Modelle verschiedener 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 größere Querschnittsfläche und eine höhere Windungszahl als die Empfangsspule. Es wird kein Eisenkern benötigt. Die Sendespule des zweiten Typs zeichnet sich durch ihre Kleinheit aus. Sie ist im Haltestift der Bürste untergebracht. 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, auch wenn sie von Firma zu Firma verschieden ist. 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 Fluss-

ses steuern, der nach dem Induktionsgesetz die Induktionsspannung erzeugt. Durch die Erhöhung der Netzfrequenz von 50 Hz auf 20 - 40 kHz steigt in der Empfangsspule die Induktionsspannung um den Faktor 400 - 800, mehr als man durch einen Eisenkern erreichen kann.

Zum Schluss muss ich noch auf einen wichtigen Punkt hinweisen. Aus nicht bekannten Gründen stören die EM-Wellen im Bereich um 30 kHz die Steuerung von cassy mobile. Daher muss man während der Experimente das Gerät erden, in dem mit einer Hand das blanke Ende eines Kabels anfasst, dessen anderes Ende man in den Erdeingang von cassy steckt. Dann lässt sich das Gerät problemlos bedienen.

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

3. Voruntersuchungen

Vier kleine Vorversuche am geschlossenen 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 $n = 1000$ oder $n = 500$ Windungen und schließt sie an ein Messwerterfassungssystem wie cassy mobile an. Man wählt im Messmenü von cassy folgende Einstellungen: Aufnahme: automatisch, Messzeit: 100 ms, Intervall: $10 \mu\text{s}$, Trigger: $U_A, 1V, \Delta, t_0 = 0$. Im Spannungsmenü U_A schaltet man die Optionen Erfassung auf Momentanwerte und Bereich auf $-3 \text{ V} - +3 \text{ V}$ um. Dann verbindet man das Ladeteil mit der Steckdose. Anschließend verkürzt man die Messzeit in cassy auf $200 \mu\text{s}$ bei einer Auflösung von $2 \mu\text{s}$ und wiederholt die Messung.

Beobachtung:

Man erhält die Kurven in Abb.1 und 2.

Auswertung:

Man erkennt eine amplitudenmodulierte Hochfrequenzschwingung mit einer Amplitude von etwa 2 V. Die Spannungen können auch erheblich größer oder kleiner als diese Werte sein. Sie hängen sehr stark vom Abstand Ladeteil-Spule und der Windungszahl der Spule ab. Eventuell muss man den Messbereich in cassy entsprechend anpassen.

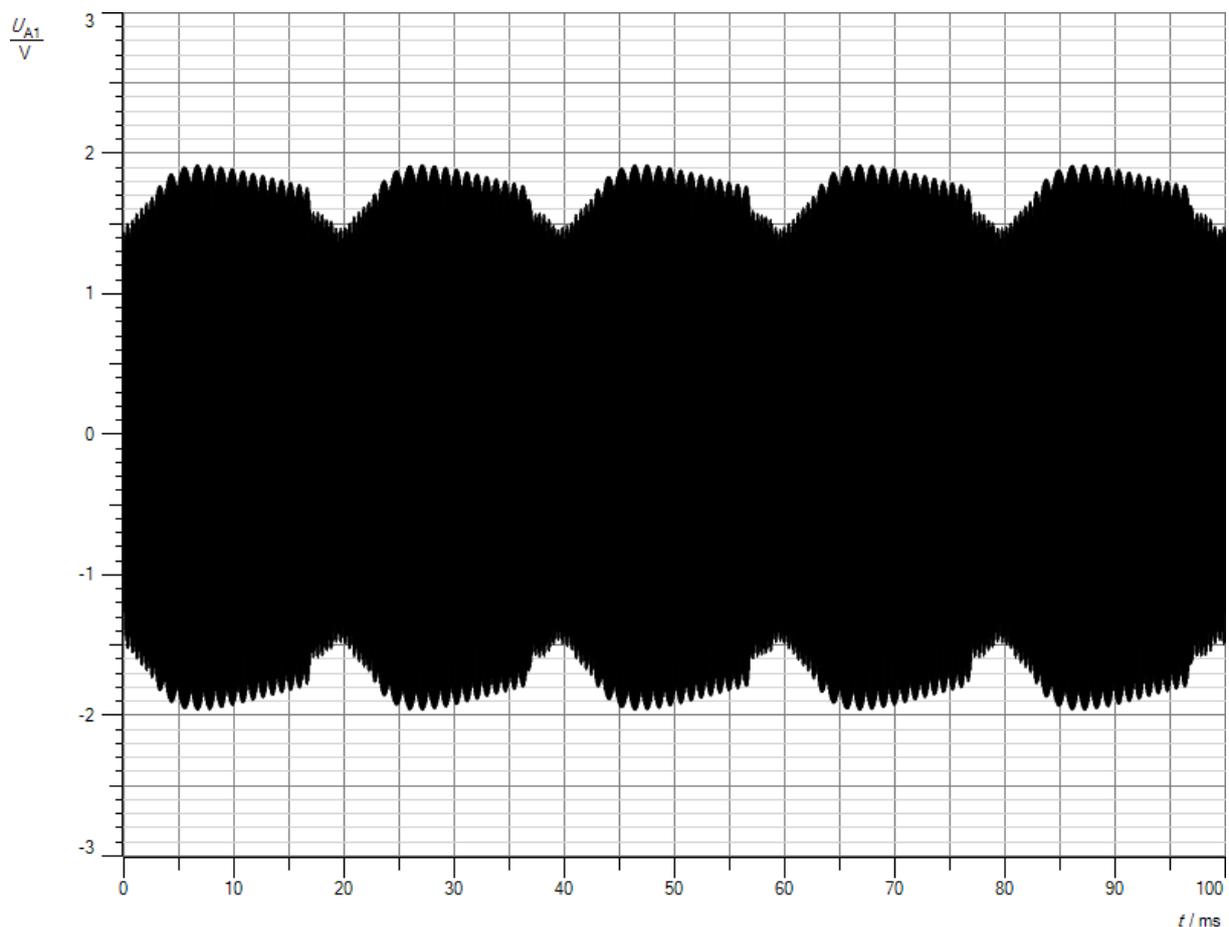


Abb.1: Spannungsverlauf bei niedriger zeitlicher Auflösung

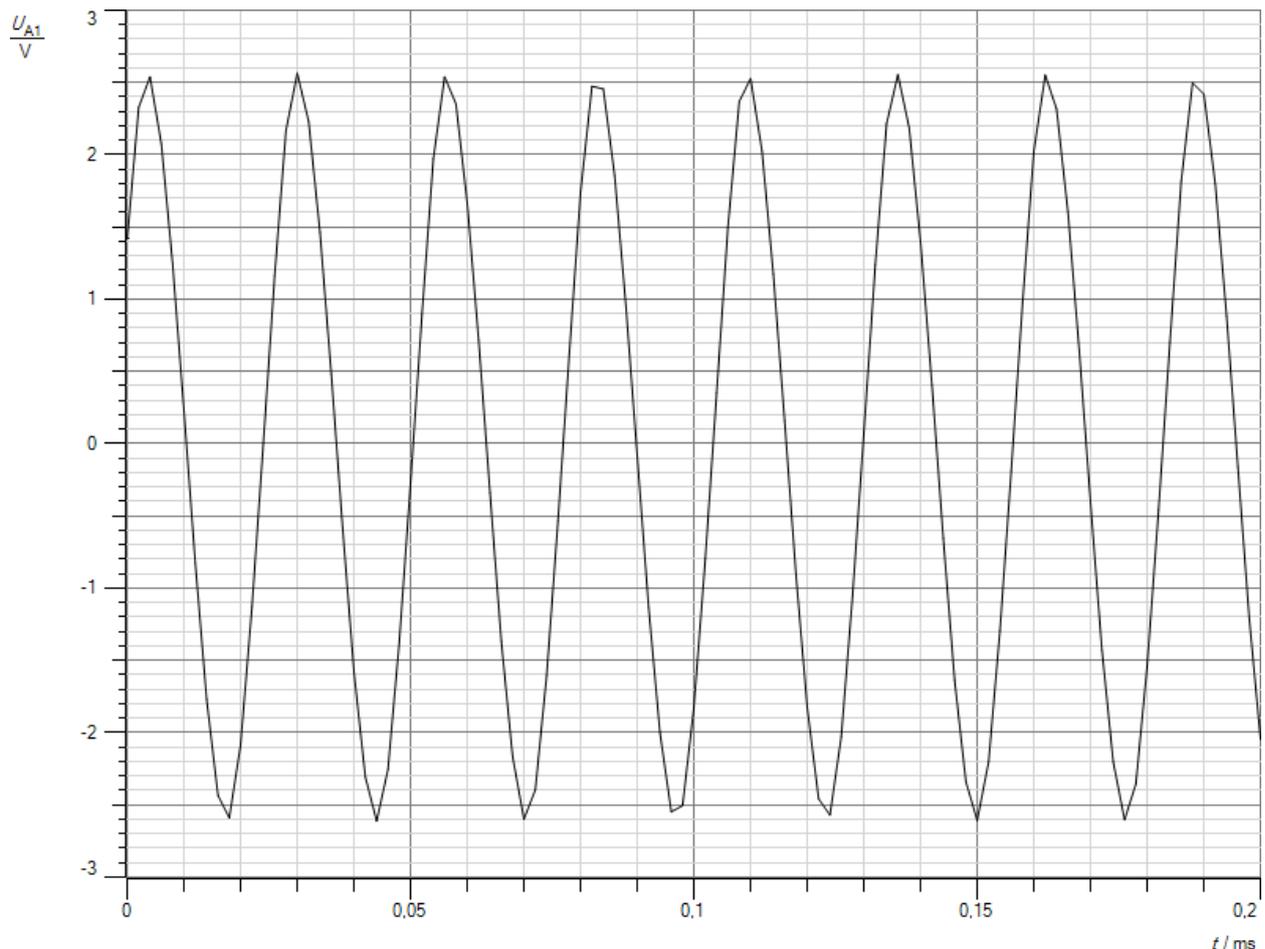


Abb. 2: Spannungsverlauf bei hoher zeitlicher Zeitauflösung

Die Modulation erfolgt mit Netzfrequenz $f = 50$ Hz. Die Modulationsspannung kann mit einer einfachen Demodulationsschaltung hörbar gemacht werden (s. **Versuch 1c**). Aus der Kurve in Abb. 2 bestimmt man die Periodendauer zu

$$T = 0,0266ms.$$

Daraus erhält man für die Frequenz f der Schwingung

$$f = \frac{1}{T} = 37,6 \text{ kHz.}$$

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 6.

Hat man kein Messwerterfassungssystem zur Verfügung, so kann man die Frequenz f auch mit einem abstimmbaren Schwingkreis und einem Digitalvoltmeter bestimmen. Manche dieser Geräte zeigen die Frequenz auch direkt an. Dazu führt man folgenden Versuch durch.

Versuch 1b: (Lehrerversuch!!!)

Durchführung:

Man schaltet zur Leybold-Spule mit $n = 1000$ Windungen einen Festkondensator mit $C = 220 \text{ pF}$ und einen Drehkondensator mit $C = 500 \text{ pF}$ parallel. Diesen Schwingkreis verbindet man mit dem Digitalmultimeter. Man wählt den höchsten Messbereich, da die Spannung sehr hoch werden kann, wenn die Entfernung der beiden Spulen gering ist. **Es ist höchste Vorsicht geboten.** Man dreht am Drehkondensator bis die Spannung am höchsten ist. 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

$$f = \frac{1}{2\pi * \sqrt{L * C}} = 37,4 \text{ kHz.}$$

Sie stimmt sehr gut mit der in Versuch 1a ermittelten Frequenz überein.

Versuch 1c:

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

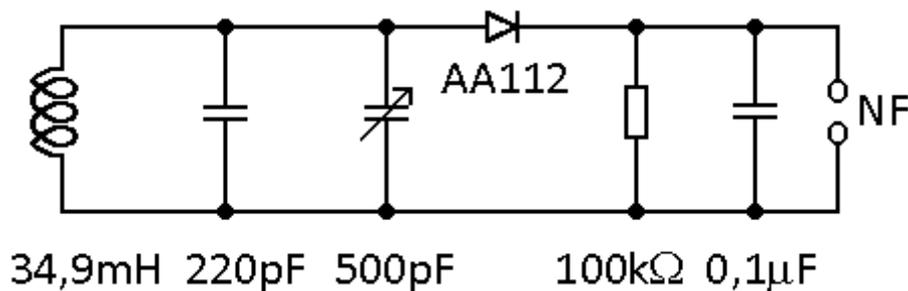


Abb. 3: Einfache Demodulationsschaltung

Durchführung:

Man schließt zunächst cassy mobile an den NF-Ausgang an. Man wählt im Messmenü folgende Einstellungen: Aufnahme: automatisch, Messzeit: 100 ms, Intervall: 100 μs , Trigger: aus. Im Spannungsmenü U_A schaltet man die Optionen Erfassung auf Momentanwerte, Bereich auf $-3 \text{ V} - +3 \text{ V}$ und Nullpunkt auf links um. Anschließend ersetzt man cassy am Empfangskreis durch einen NF-Verstärker mit Lautsprecher.

Beobachtung:

Man erhält die Messkurve in Abb. 4.

Auswertung:

Man erkennt eine Schwingung mit der Periodendauer $T = 20 \text{ ms}$ und damit der Frequenz $f = 50 \text{ Hz}$. Aus dem Lautsprecher ertönt ein lauter Brummtön. Der grundsätzliche Verlauf der

Modulationsspannung mit einem steilen Anstieg und einem langsamen Abfall der Spannung ist typisch für die Spannung am Glättungskondensator eines Gleichrichters. Die starken Einbrüche am Ende der Entladungsphase des Kondensators rühren vermutlich daher, dass der Glättungskondensator zu gering bemessen ist (s. Versuch 3a und b in Kapitel 4.1). Am Ende seiner Entladungsphase fällt somit die Betriebsspannung für den Oszillator so weit ab, dass der Transistor nicht mehr optimal durchschalten kann und so weniger Energie in den Schwingkreis pumpt. Die Amplitude sinkt.

Folgerung:

Aus den drei Teilversuchen folgt insgesamt, dass das Ladeteil 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 stabilisiert, so dass der Hochfrequenzoszillator leicht amplitudenmoduliert wird. Öffnet man das Gehäuse des Ladeteils, so findet man die Vermutungen voll bestätigt, wie im nächsten Kapitel genauer dargestellt wird.

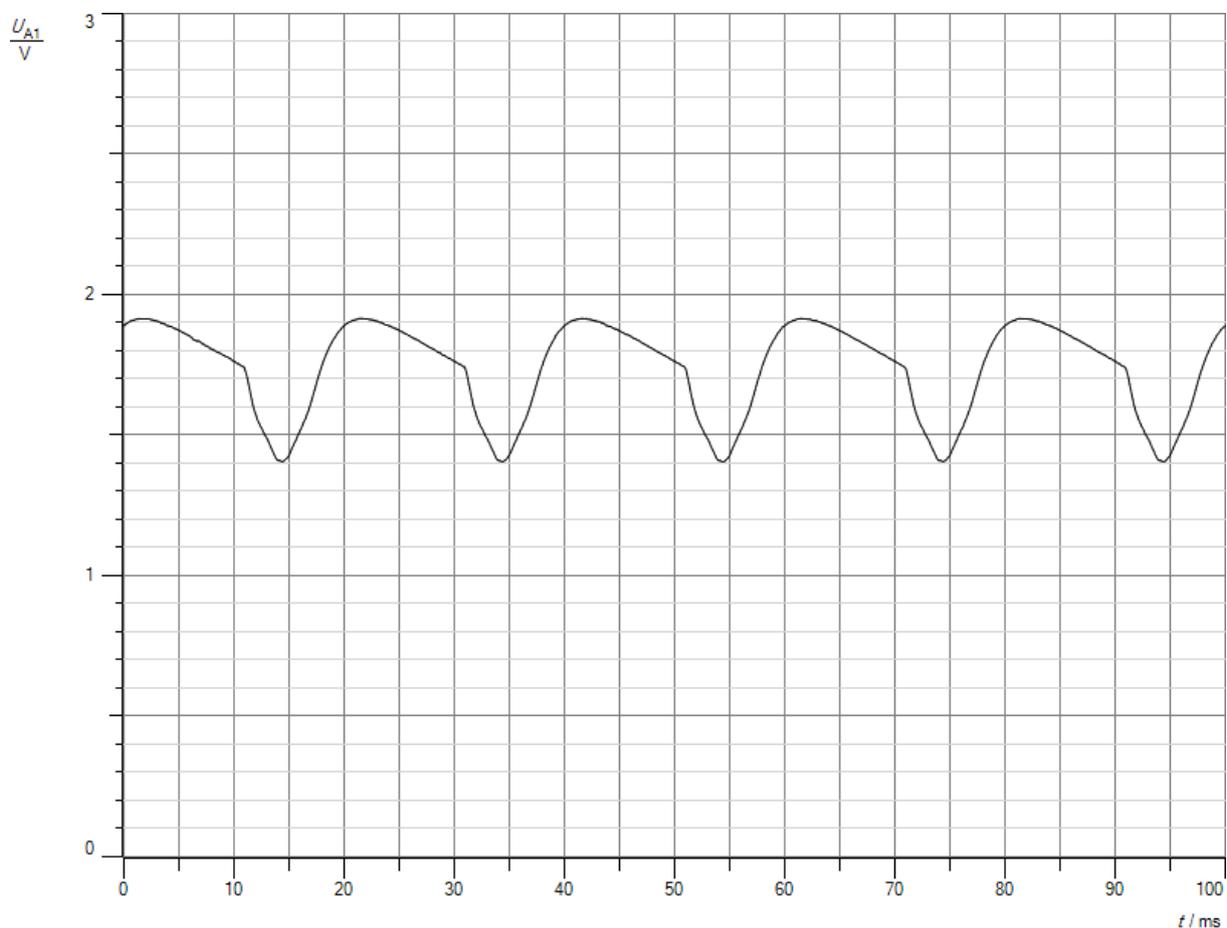


Abb.4: Demodulierte NF-Spannung

Mit dem geschlossenen Ladeteil lässt sich in einem weiteren Versuch eindrucksvoll zeigen, dass Energie von ihm auf die Bürste übertragen wird. Da das Ladeteil auf einer festen Frequenz von ca. $f = 37$ kHz sendet, kann man den Empfang dadurch verbessern, dass man einen Empfangskreis baut, der näherungsweise in Resonanz mit dem Sendeteil schwingt. Man wählt z.B. als Empfangsspule eine kleine Induktivität mit $L = 0,1$ mH und schaltet ihr einen

handelsüblichen Kondensator mit $C = 220 \text{ nF}$ parallel. Dieser Empfangskreis besitzt nach der Thomsonschen Schwingungsformel eine Resonanzfrequenz f , für die gilt:

$$f = \frac{1}{2\pi * \sqrt{L * C}} = 33,9 \text{ kHz.}$$

Sie ist etwas kleiner als die Sendefrequenz des Ladeteils, aber die Resonanz reicht aus, um eine weiße LED zum Leuchten zu bringen und einen kleinen Solarmotor anzutreiben, wenn man den Empfangskreis in die Tasche des Ladeteils steckt. Allerdings muss man beiden einen Gleichrichter vorschalten, da sie mit Gleichspannung betrieben werden. Für den Betrieb der LED glättet man sie außerdem mit einem Kondensator. Es ergibt sich insgesamt folgende Empfangsschaltung:

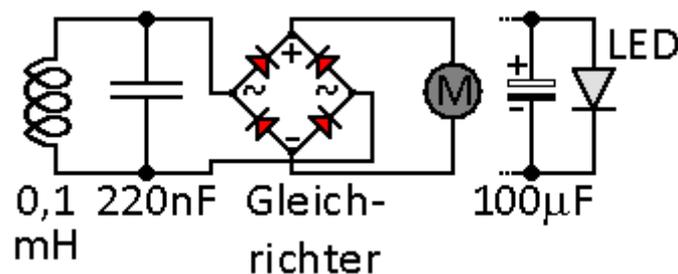


Abb.1: Energieempfänger

Mit dieser Schaltung führt man folgenden Versuch durch.

Versuch 2:

Durchführung:

Man verbindet den Empfangskreis mit dem Gleichrichter und schließt an ihn die LED bzw. den Motor an. Dann steckt den Empfangskreis in die Tasche des Ladeteils.

Beobachtung:

Die LED leuchtet und der Motor läuft.

Erklärung:

Das Ladeteil induziert im Empfangskreis eine Induktionsspannung, die so groß ist, dass der Motor und die LED problemlos betrieben werden können.

4.Schaltungen

4.1 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. 1.

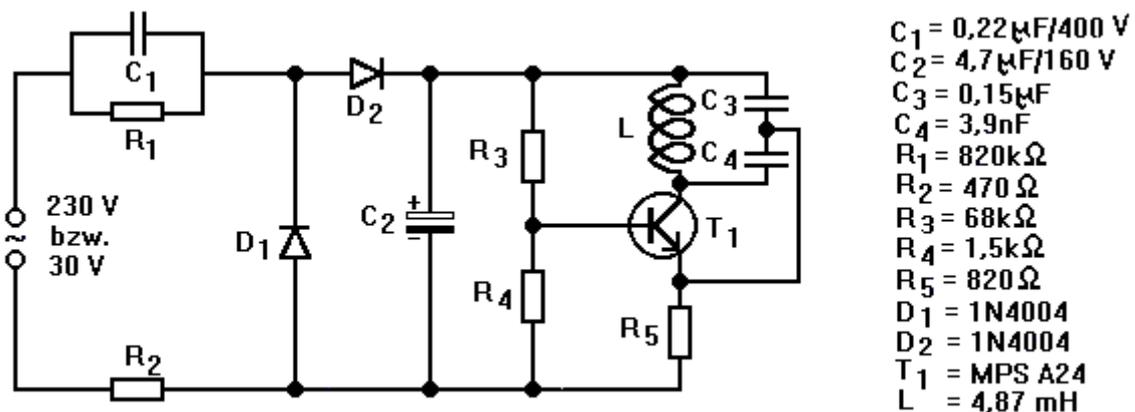


Abb. 1: Schaltplan Ladeteil

Die Schaltung besteht wie in Kapitel 3 vermutet aus zwei Teilen

- einem LC-Oszillator und
- einem Kaskadengleichrichter.

Sie soll mit den folgenden Versuchen genauer analysiert werden. Dabei kommen weitere sehr interessante Einzelheiten zutage. **Einige der folgenden Untersuchungen sind gefährlich, da man am offenen Gehäuse mit der Netzspannung von $U_{\text{eff}} = 230 \text{ V}$ arbeiten muss. Solche Experimente dürfen nur von erfahrenen Experimentatoren mit speziellen berührungssicheren Abgreifklemmen und einem Trenntrafo vorgenommen werden. Sie sind für Schüler absolut tabu.** Damit sie auch experimentieren können, werden Ersatzschaltungen für kleine Spannungen vorgestellt, die die wesentlichen Ergebnisse ebenfalls liefern.

Zunächst wenden wir uns dem Oszillator zu. Er sollte aus den beiden Kondensatoren C₃ und C₄ und der Spule L bestehen. Der Transistor führt im durchgeschalteten Zustand dem Schwingkreis im Takte der Hochfrequenz Energie zu, um ihn zu entdämpfen. Es handelt sich um einen Colpits-Oszillator mit Emitterrückkopplung. Die Kondensatoren C₃ und C₄ (s. Abb. 1) tragen die Aufschriften C₃ = 0,15 μF und C₄ = 3,9 nF. Daraus ergibt sich mit Hilfe des Gesetzes für die Reihenschaltung von Kondensatoren

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

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

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi * \sqrt{L * C_{ges}}} = 37kHz,$$

in guter Übereinstimmung mit dem Messwert in Kapitel 3. Die errechnete Frequenz kann man überprüfen, in dem man mit speziellen berührungssicheren Abgreifklemmen die Spannung am Emitterwiderstand misst.

Versuch 1: (Lehrerversuch!!!)

Durchführung:

Man verbindet den Emitterwiderstand R_5 in Schaltung 1 mit berührungssicheren Abgreifklemmen mit dem Spannungseingang von cassy. Man wählt im Messmenü folgende Einstellungen: Aufnahme: automatisch, Messzeit: 200 μs , Intervall: 2 μs , Trigger: aus. Im Spannungsmenü U_A schaltet man die Optionen Erfassung auf Momentanwerte, Bereich auf -10 V - +10 V und Nullpunkt auf links um. Dann steckt man den Stecker des Ladeteils in die Steckdose und startet die Messung. Anschließend erhöht man die Messzeit in cassy auf 100 ms bei einer Auflösung von 10 μs und wiederholt die Messung.

Beobachtung:

Man erhält im 1. Teilversuch die Kurve in Abb. 2. Bei niedriger zeitlicher Auflösung zeigt die Modulationsspannung den gleichen Verlauf wie in Versuch 1 in Kapitel 3.

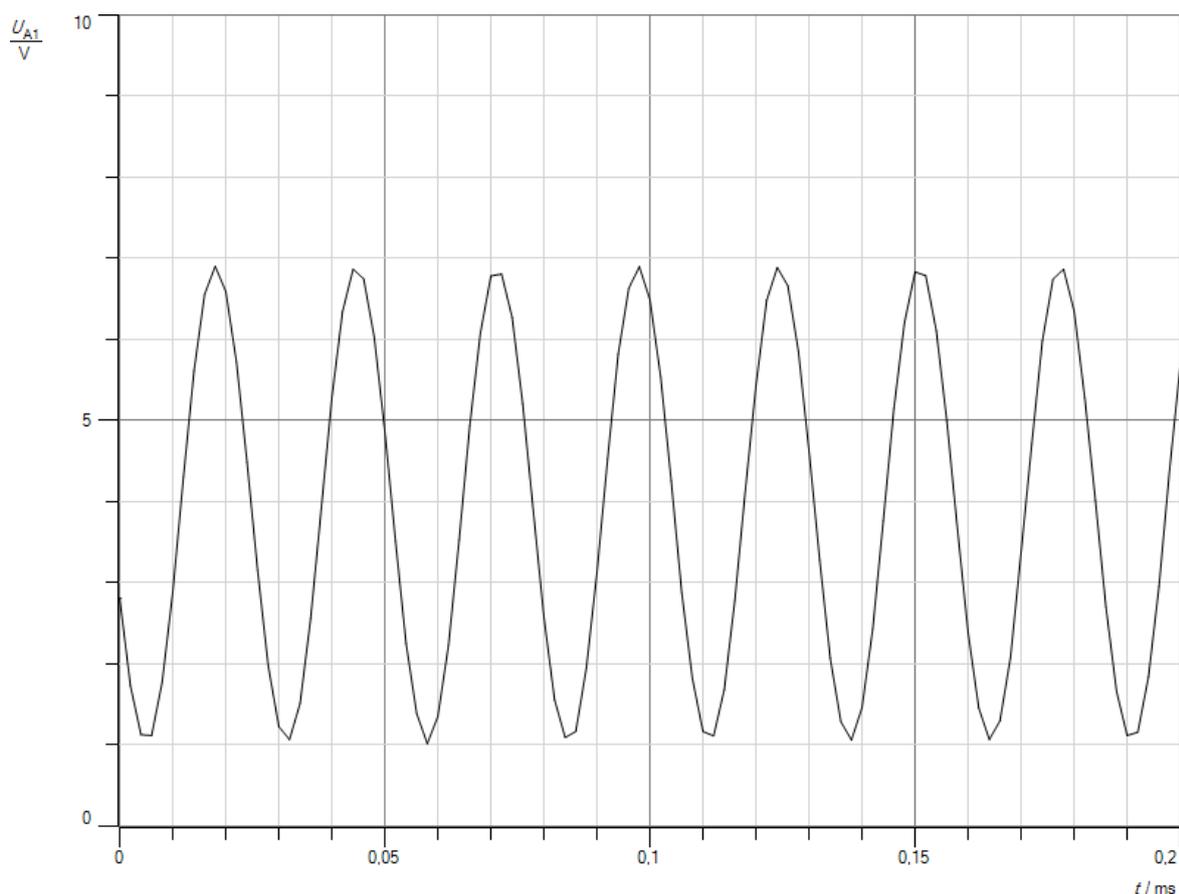


Abb. 2: Spannungsverlauf am Emitterwiderstand des Ladeteils

Auswertung:

Aus der Kurve erhält man für die Periodendauer

$$T = 26,6\mu s$$

und damit für die Frequenz f

$$f = \frac{1}{T} = 37,5kHz.$$

Um zu zeigen, dass man mit diesem Oszillator Energie übertragen kann, können die Schüler ihn mit wenigen Bauteilen nachbauen und mit einer ungefährlichen Spannung von $U = 20\text{ V}$ betreiben. Wegen der niedrigeren Betriebsspannung muss man die Widerstände ein wenig anpassen. Man erhält die Schaltung in Abb. 3. Die benötigten Spulen kann man sich aus einer alten Zahnbürste ausbauen oder sich vergleichbare Spulen im Elektronikhandel besorgen. Als Empfangsteil dient die Schaltung in Abb. 4. Man kann auch die Empfangsschaltung aus Versuch 2 in Kapitel 3 benutzen, da die Schaltung fast mit der gleichen Frequenz schwingt wie das Ladeteil der Zahnbürste (s. Kapitel 5).

Versuch 2a:

Durchführung:

Man baut die Sende- und Empfangsschaltung in Abb. 3 und 4 auf. Damit genügend Energie übertragen wird, steckt man die beiden Spulen ineinander oder drückt sie, wenn das nicht geht, mit den Stirnflächen fest zusammen. Im zweiten Teilversuch tauscht man den Motor gegen die LED aus.

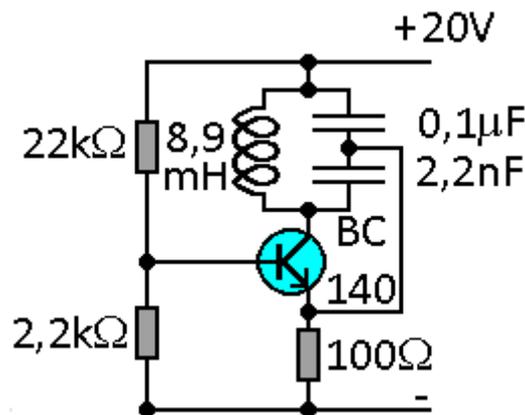


Abb.3: Energiesender

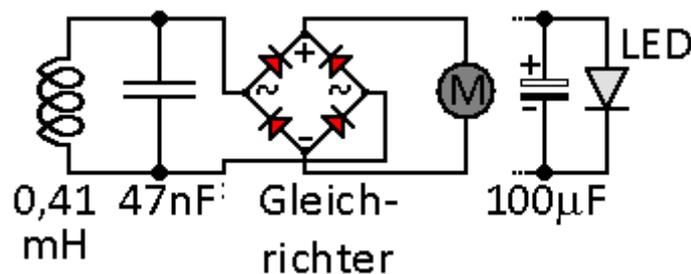


Abb.4: Energieempfänger

Beobachtung:

Die LED leuchtet hell auf und der Motor läuft. Manchmal muss man ihn von Hand kurz anstoßen.

Erklärung:

Die Sendespule induziert in der Empfangsspule eine Induktionsspannung. Ist die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses zwischen den beiden Spulen groß genug, so leuchtet die LED und der Motor läuft.

Um die Sendefrequenz des selbstgebauten Energiesenders zu bestimmen, kann man entweder die Spannung am Emitterwiderstand des Senders, an der Sendespule oder an der Empfangsspule aufzeichnen. Im folgenden Versuch wird die Spannung am Emitterwiderstand gemessen.

Versuch 2b:

Durchführung:

Man baut die Sendeschaltung und Empfangsschaltung in Abb. 3 und 4 auf. Man greift mit cassy mobile die Spannung am Emitterwiderstand des Senders ab. Man wählt im Messmenü von cassy folgende Einstellungen: Aufnahme: automatisch, Messzeit: 200 μs , Intervall: 2 μs , Trigger: aus. Im Spannungsmenü U_A schaltet man die Optionen Erfassung auf Momentanwerte und Bereich auf -3 V - +3 V und Nullpunkt links um.

Beobachtung:

Man erhält die Kurve in Abb. 5.

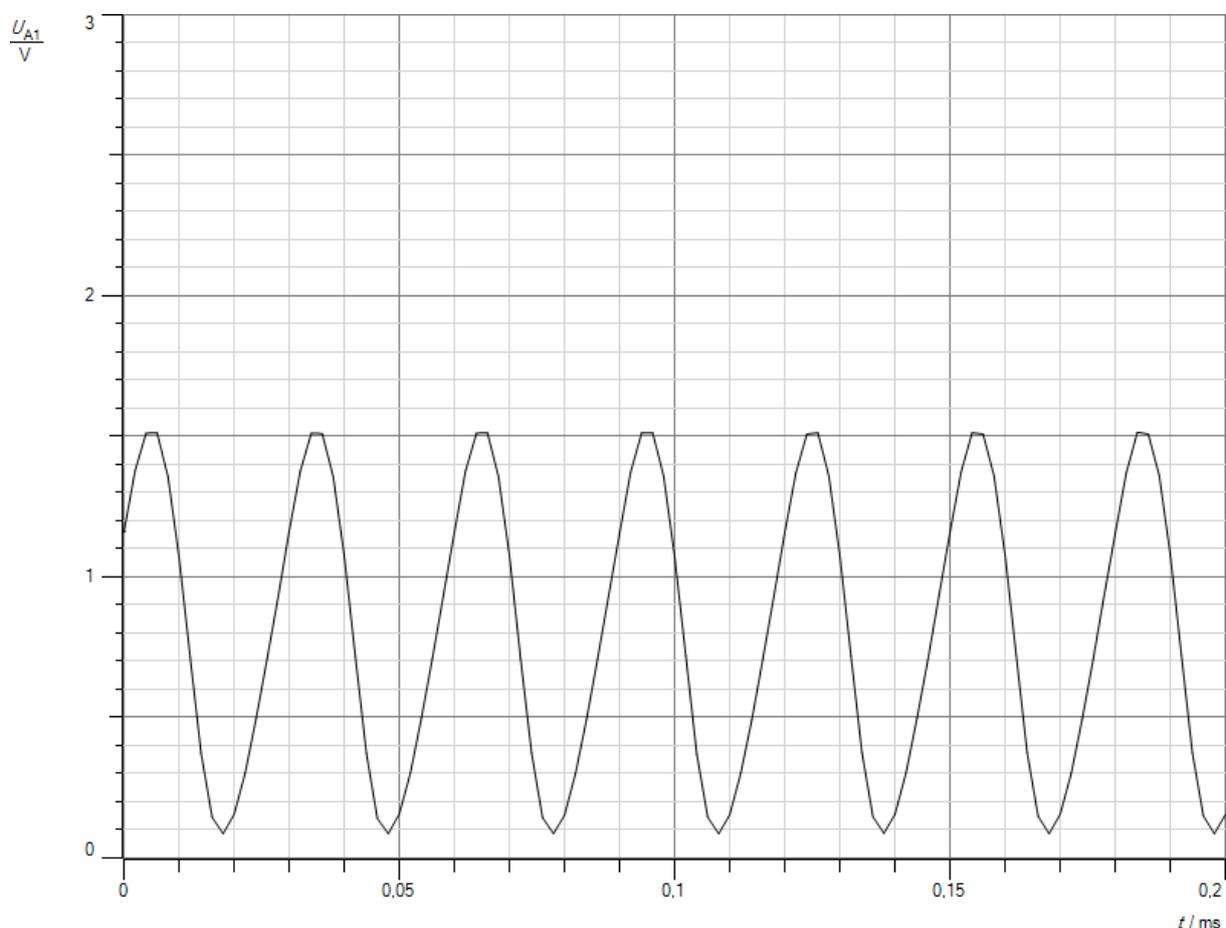


Abb. 5: Spannung am Emitterwiderstand des Energiesenders

Aus der Kurve bestimmt man die Periodendauer und erhält

$$T = 30\mu s$$

und damit für die Frequenz f:

$$f = \frac{1}{T} = 33,3\text{kHz}.$$

Um die theoretische Frequenz des Oszillators zu ermitteln, errechnet man zunächst die Gesamtkapazität der beiden in Reihe geschalteten Kondensatoren in Abb. 3. Es gilt:

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{100\text{nF}} + \frac{1}{2,2\text{nF}} = \frac{0,465}{\text{nF}}.$$

Daraus folgt für C_{ges} :

$$C_{ges} = 2,15\text{ nF}.$$

Mit der Thomsonschen Schwingungsformal erhält man für die Periodendauer T bzw. die Frequenz f des Senders:

$$T = 2\pi * \sqrt{L * C} = 2\pi * \sqrt{8,9\text{ mH} * 2,15\text{nF}} = 0,275\text{ms}$$

und für f:

$$f = \frac{1}{T} = 36,4\text{ kHz}.$$

Für die theoretische Frequenz des Empfangskreises gilt;

$$f = \frac{1}{2\pi * \sqrt{0,41\text{ mH} * 47\text{nF}}} = 36,3\text{ kHz}.$$

Die theoretischen Frequenzen des Senders und Empfängers sind fast identisch und stimmen unter Berücksichtigung der Toleranzen der verwendeten Bauteile gut mit dem gemessenen Wert überein. Außerdem entsprechen sie annähernd der Frequenz, die in der Zahnbürste genutzt wird (s. Kapitel 3).

Der Oszillator funktioniert wie folgt: Beim Einschalten werden die Kondensatoren C_3 und C_4 in Abb.1 durch den Kollektorstrom des Transistors aufgeladen. Sie bilden einen kapazitiven Spannungsteiler. Sie entladen sich in der Sperrphase des Transistors über die Spule. Der Schwingkreis wird 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 geführt. Dadurch wird der Transistor im Takte der Hochfre-

quenz ein- und ausgeschaltet. Im leitenden Zustand versorgt er den Schwingkreis mit neuer Energie, um die Energieverluste an die Bürste aufgrund der induktiven Kopplung zu kompensieren. 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 Radiosendern ist eine kapazitative Rückkopplung möglich. Entscheidend für das Durchschalten des Transistors ist 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. Auf die Frage, warum die Energie vom Ladeteil auf die Bürste mit einem hochfrequenten Wechselfeld übertragen wird, werde ich in Kapitel 6 näher eingehen.

Wenden wir uns als nächstes dem Gleichrichter zu. Im Schaltplan (s. Abb.1) fallen zwei Besonderheiten auf. Erstens fehlt in einem Kaskadengleichrichter normalerweise der Widerstand R_1 . Er ist für die Funktion nicht erforderlich und muss daher eine zusätzliche Bedeutung haben. Zweitens trägt der Kondensator am Ausgang des Gleichrichters die Aufschrift 160 V. Laut Literatur werden Kaskadengleichrichter üblicherweise benutzt, um hohe Gleichspannungen zu erzeugen, die der mehrfachen Amplitude der eingesetzten Wechselspannung entsprechen. Bei der doppelten Amplitude müsste er somit für

$$U = 2 * \sqrt{2} * 230 V = 650 V$$

ausgelegt sein. Um die tatsächliche Spannung am Kondensator zu überprüfen, greift man sie mit speziellen Klemmen berührungssicher am Kondensator ab und zeichnet sie mit cassy auf. Da cassy maximal Spannungen bis 30 V messen kann, muss man sie über ein Potentiometer mit $R = 100 \text{ k}\Omega$ herunterregeln.

Versuch 3a: (Lehrerversuch!!!)

Durchführung:

Man verbindet den Glättungskondensator C_2 in Abb. 1 mit berührungssicheren Abgreifklemmen mit dem Minus- bzw. Pluspol des Potentiometers. An den Mittenabgriff und den Minuspol des Potis schließt man den Spannungseingang von cassy an. Man wählt im Messmenü folgende Einstellungen: Aufnahme: automatisch, Messzeit: 100 ms, Intervall: 100 μ s, Trigger: aus. Im Spannungsmenü U_A schaltet man die Optionen Erfassung auf Momentanwerte, Bereich auf -10 V - +10 V und Nullpunkt auf links um. Man bringt das Poti in Nullstellung und steckt den Stecker des Ladeteils in die Steckdose. Man dreht das Poti langsam auf bis die Spannung an cassy etwa 7 V beträgt. Dann startet man die Messung. Man zieht den Stecker, klemmt das Poti vom Kondensator ab und bestimmt den Gesamtwiderstand R des Potis und den Widerstand R_M am Mittenabgriff.

Beobachtung:

Man erhält bei einem Widerstand des Potentiometers am Mittenabgriff von $R_M = 8,0 \text{ k}\Omega$ und einem Gesamtwiderstand des Potis von $R = 95,9 \text{ k}\Omega$ die Kurve in Abb. 6a. Deutlich erkennt man, dass die Spannung am Glättungskondensator stark schwankt und zwar zwischen

$$U_1 = \frac{95,9 \text{ k}\Omega}{8,0 \text{ k}\Omega} * 6,79 \text{ V} = 81,4 \text{ V}$$

und

$$U_2 = \frac{95,9k\Omega}{8,0k\Omega} * 7,97V = 95,5V.$$

Damit bestätigt sich die Vermutung aus Kapitel 3, dass der Glättungskondensator für den Oszillator zu schwach ausgelegt ist und damit den Verlauf der Modulationsspannung in Versuch 1 in Kapitel 3 verursacht. Ein weiterer Beweis liefert die Überprüfung der Spannung am Basiswiderstand R_4 des Transistors. Über ihn werden dessen Durchlass und damit die Energiezufuhr in den Schwingkreis gesteuert. Der Einbruch der Amplitude am Ende der Entlade- phase (s. Kapitel 3) rührt vermutlich daher, dass die Basisspannung so weit absinkt, dass der Transistor nicht mehr im linearen Verstärkungsbereich arbeitet.

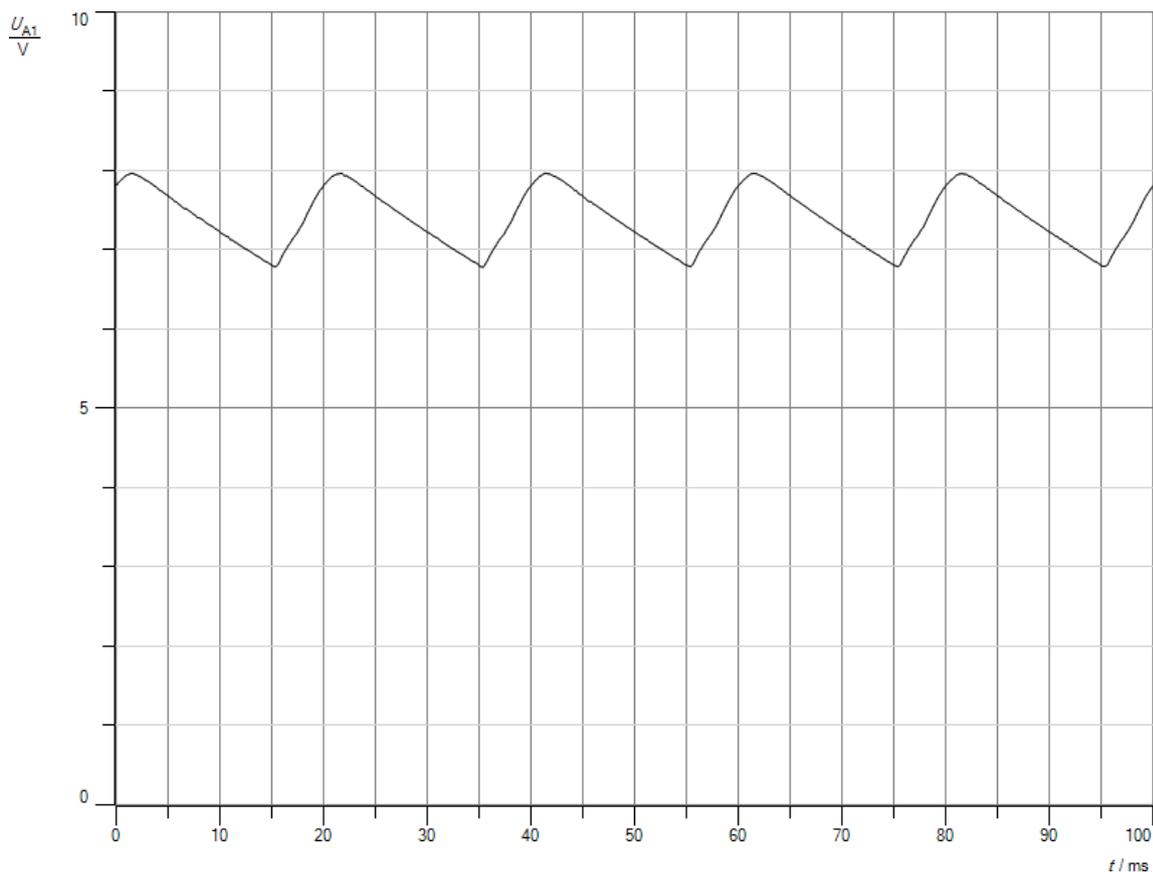


Abb. 6a: Spannungsverlauf am Glättungskondensator

Versuch 3b: (Lehrerversuch!!!)

Durchführung:

Man verbindet den Basiswiderstand R_4 in Abb. 1 mit berührungssicheren Abgreifklemmen mit dem Spannungseingang von cassy. Man wählt im Messmenü folgende Einstellungen: Aufnahme: automatisch, Messzeit: 100 ms, Intervall: 100 μ s, Trigger: aus. Im Spannungsmenü U_A schaltet man die Optionen Erfassung auf Momentanwerte, Bereich auf - 3V - +3 V und Nullpunkt auf links um. Man steckt den Stecker des Ladeteils in die Steckdose und startet die Messung.

Beobachtung:

Man erhält die Kurve in Abb. 6b.

Auswertung:

Deutlich erkennt man, dass die Basisspannung im Takte der Glättungsspannung des Kondensators schwankt und damit den Transistor mehr oder weniger durchschaltet. Die Energiezufuhr in den Schwingkreis ist nicht konstant und damit auch nicht die Amplitude der Schwingung.

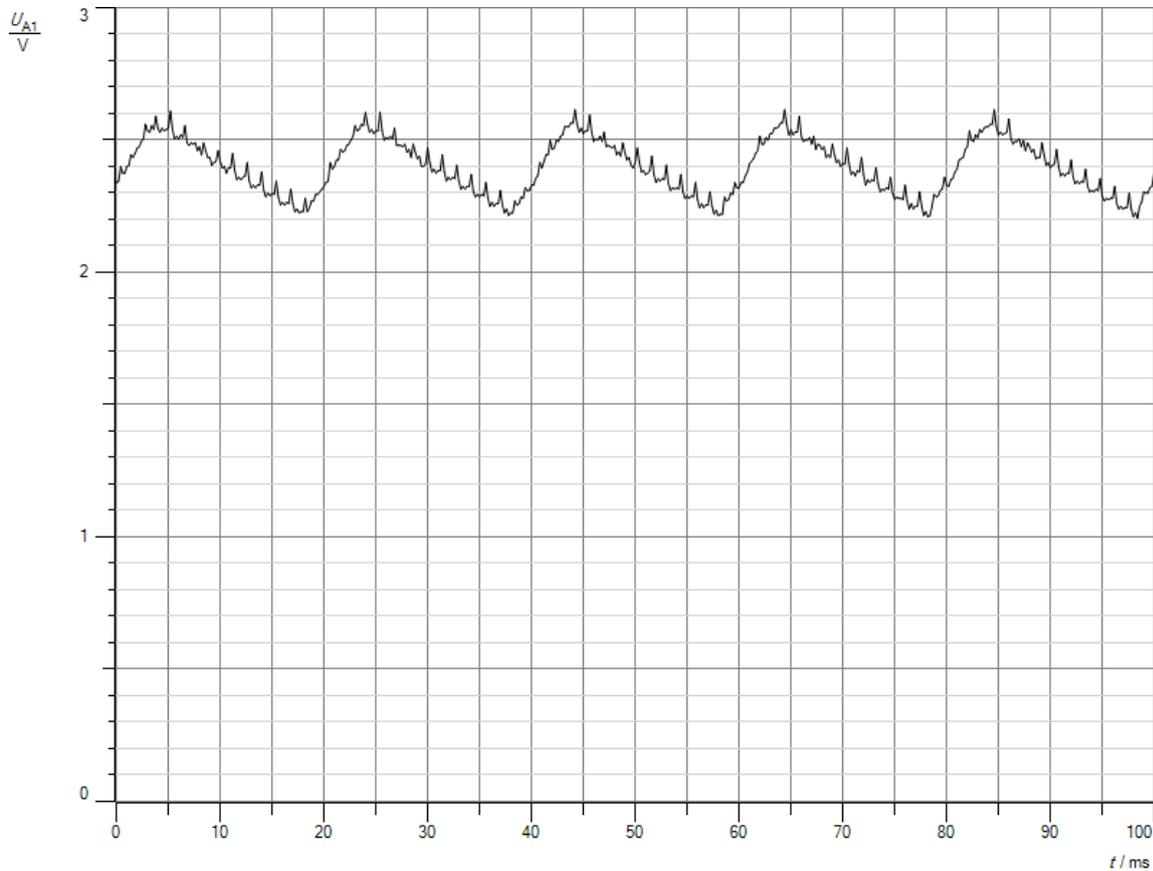


Abb. 6b: Spannungsverlauf am Basiswiderstand

Um die Eigenschaften eines Kaskadengleichrichters genauer zu untersuchen, bauen die Schüler den Gleichrichter mit wenigen Bauteilen nach Abb. 7 nach. Die Schaltung ist so ausgelegt, dass man sie mit ungefährlichen $U_{\text{eff}} = 6 \text{ V}$ betreiben kann. Außerdem wurden nur gängige Bauteile verwendet. Sollte kein Potentiometer mit $R = 500 \text{ k}\Omega$ zur Verfügung stehen, kann man auch eins mit $R = 1 \text{ M}\Omega$ benutzen.

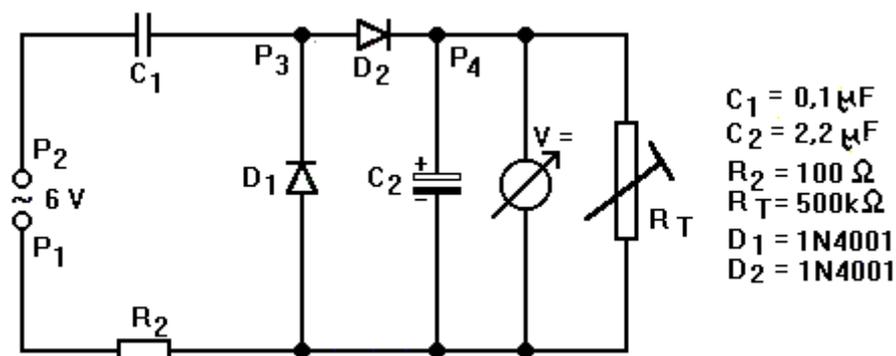


Abb. 7: Schaltplan

Versuch 4:

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 4a:

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 4b:

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 4c:

Durchführung:

Man ersetzt das Voltmeter durch cassy. Man wählt im Messmenü folgende Einstellungen: Aufnahme: automatisch, Messzeit: 100 ms , Intervall: $100 \mu\text{s}$, Trigger: aus. Im Spannungsmenü U_A schaltet man die Optionen Erfassung auf Momentanwerte, Bereich auf $-10 \text{ V} - +10 \text{ V}$ und Nullpunkt auf links um. Dann tauscht man den Kondensator $C = 2,2 \mu\text{F}$ gegen einen mit $C = 0,1 \mu\text{F}$ aus.

Beobachtung:

Man erhält die Messkurven in Abb. 8a und b. Die Gleichspannung ist am Kondensator $C = 0,1 \mu\text{F}$ weit weniger gut geglättet. Der Spitzenwert der Spannung steigt leicht an.

Erklärung:

Der Kondensator mit der kleineren Kapazität lädt sich bei gleicher Stromstärke während der Ladephase auf eine höhere Spannung auf und wird in der Entladezeit stärker entladen.

Versuch 4d:

Durchführung:

In der Schaltung nach Abb. 7 variieren die Schüler die Stellung des Potentiometers.

Beobachtung:

Wird der Widerstand kleiner, so sinkt die Spannung.

Versuch 4e:

Durchführung:

In der Schaltung nach Abb. 7 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 .

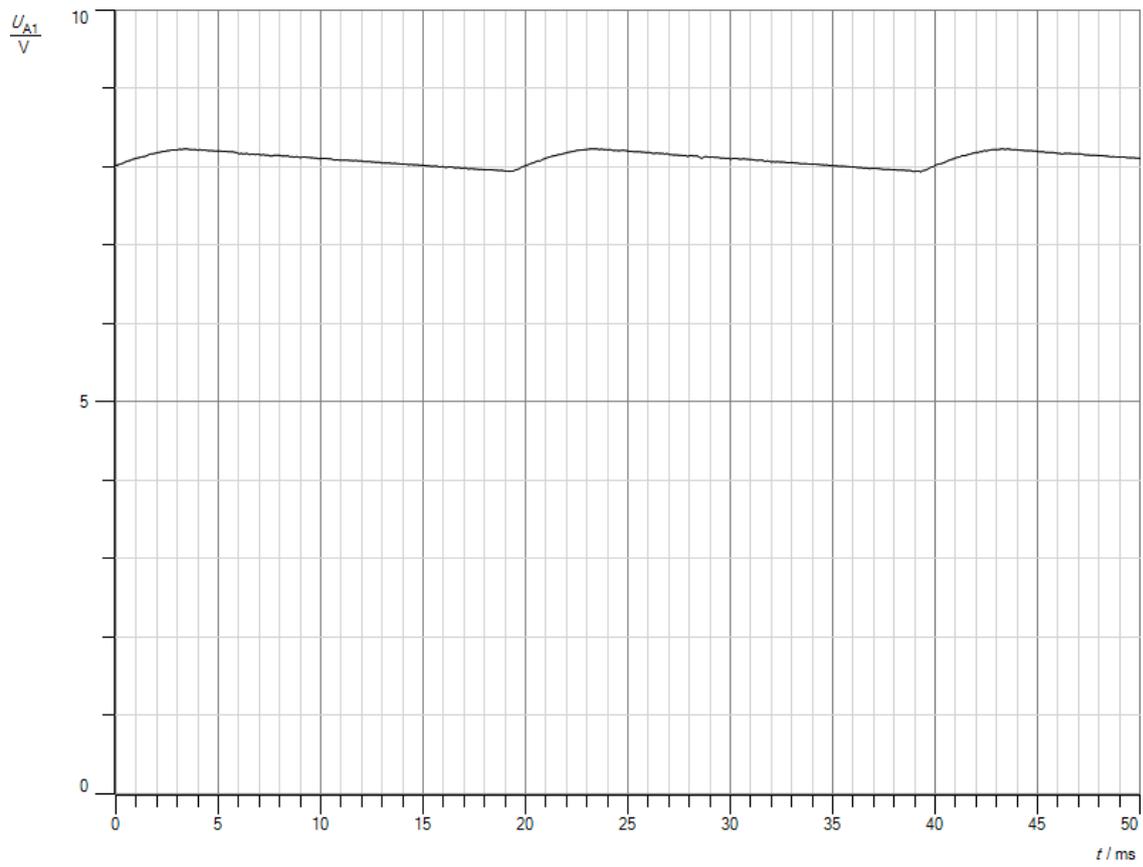


Abb. 8a: Spannungsverlauf bei $C = 2,2 \mu\text{F}$

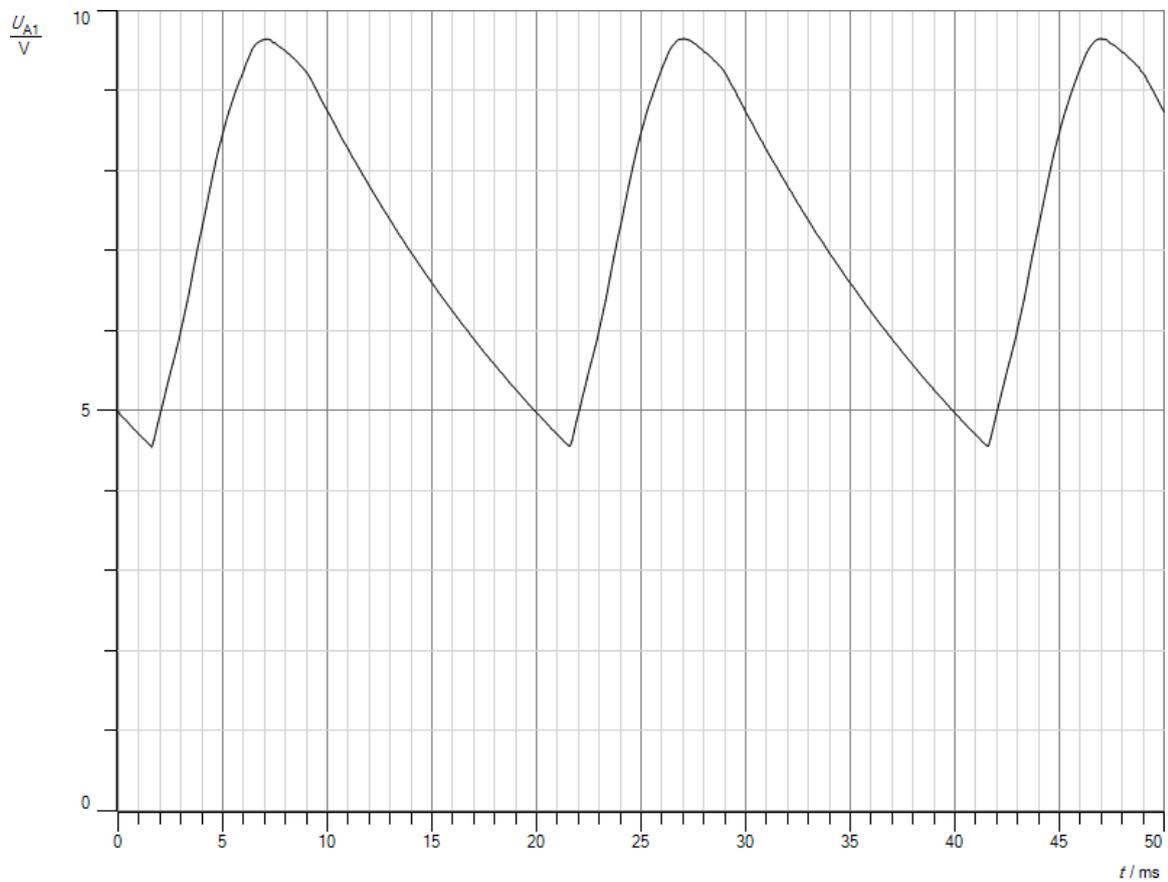


Abb. 8b: Spannungsverlauf bei $C = 0,1 \mu\text{F}$

Folgerungen aus den Versuchen:

Aus den Versuchen 4a - e ergeben sich folgende qualitative Zusammenhänge:

- 1) Die abnehmbare Gleichspannung ist umso größer, je größer die Kapazität von C_1 ist. Sie hängt nur wenig von C_2 ab. Sie kann auch kleiner sein als die Amplitude der eingesetzten Wechselspannung.
- 2) Die Glättung der Gleichspannung ist umso besser, je größer die Kapazität des Kondensators C_2 ist. Wollte man die Spannungsschwankungen komplett ausgleichen, so müsste man zwischen Gleichrichter und Oszillator einen Spannungs- oder Schaltregler legen. Da sie bei der Energieübertragung in der Zahnbürste nicht stören, kann man sich das zusätzliche Bauteil sparen.
- 3) Die abnehmbare Gleichspannung eines Kaskadengleichrichters ist umso 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. Somit 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.

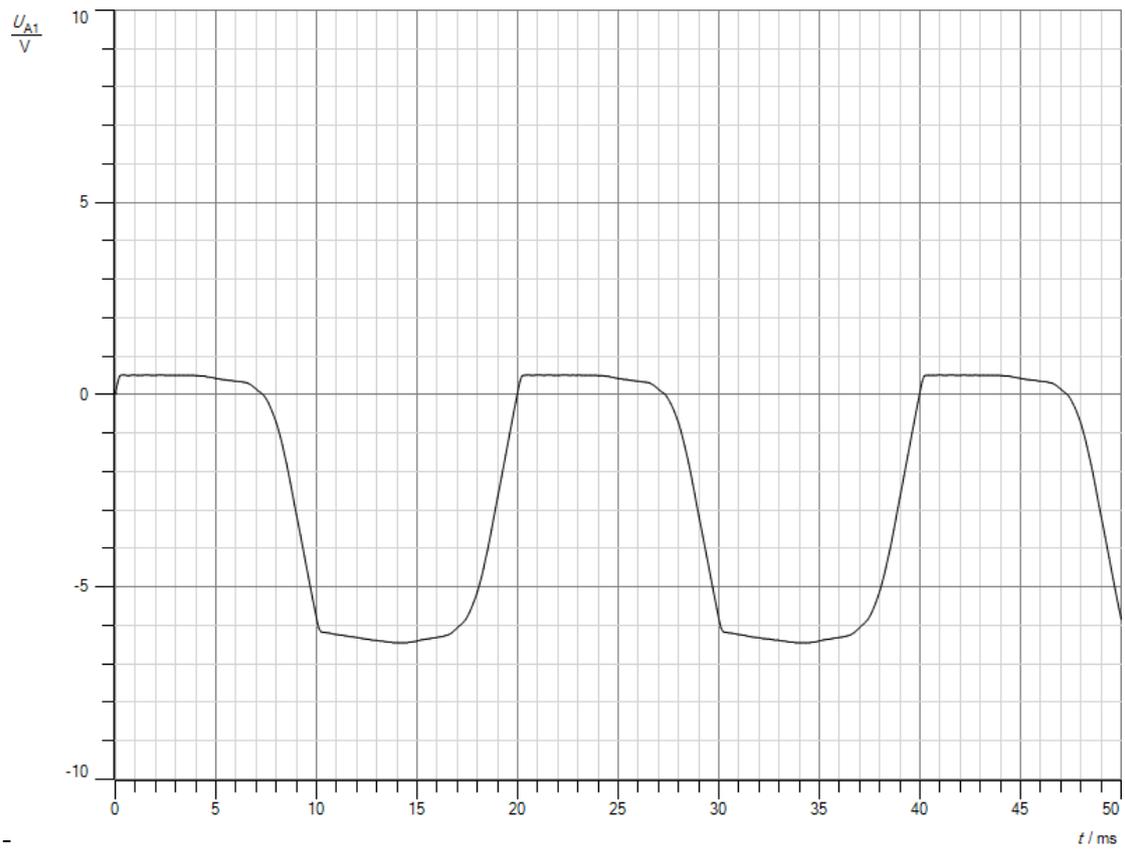


Abb. 9a: Spannungsverlauf an D_1

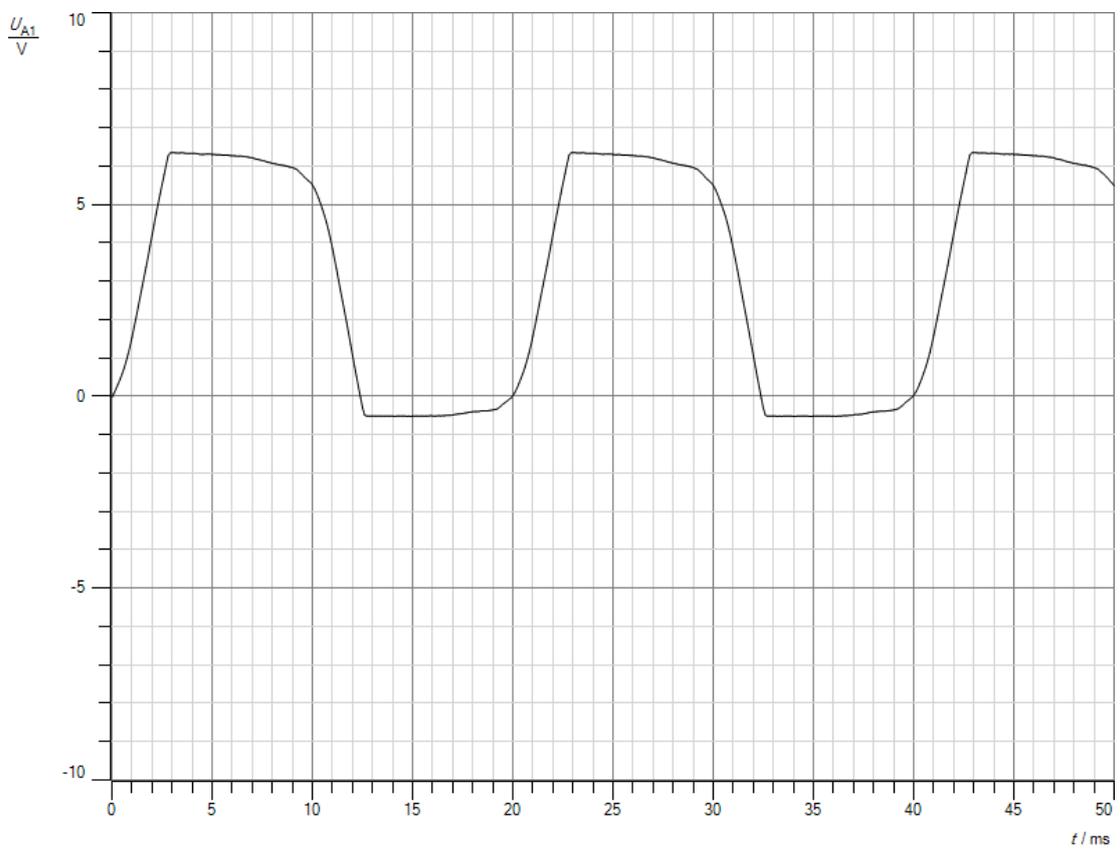


Abb. 9b: Spannungsverlauf an D_2

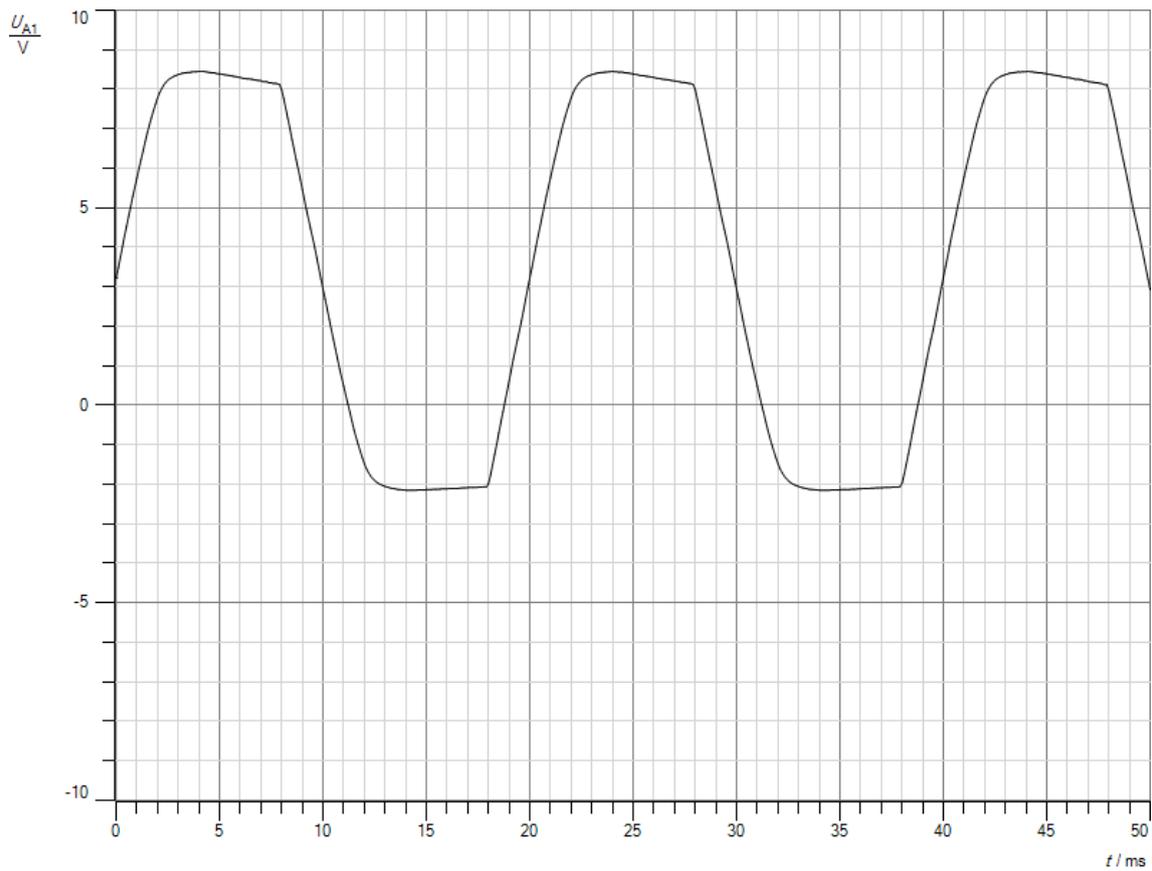


Abb. 9c: Spannungsverlauf an C_1 bei kleinem Messwiderstand

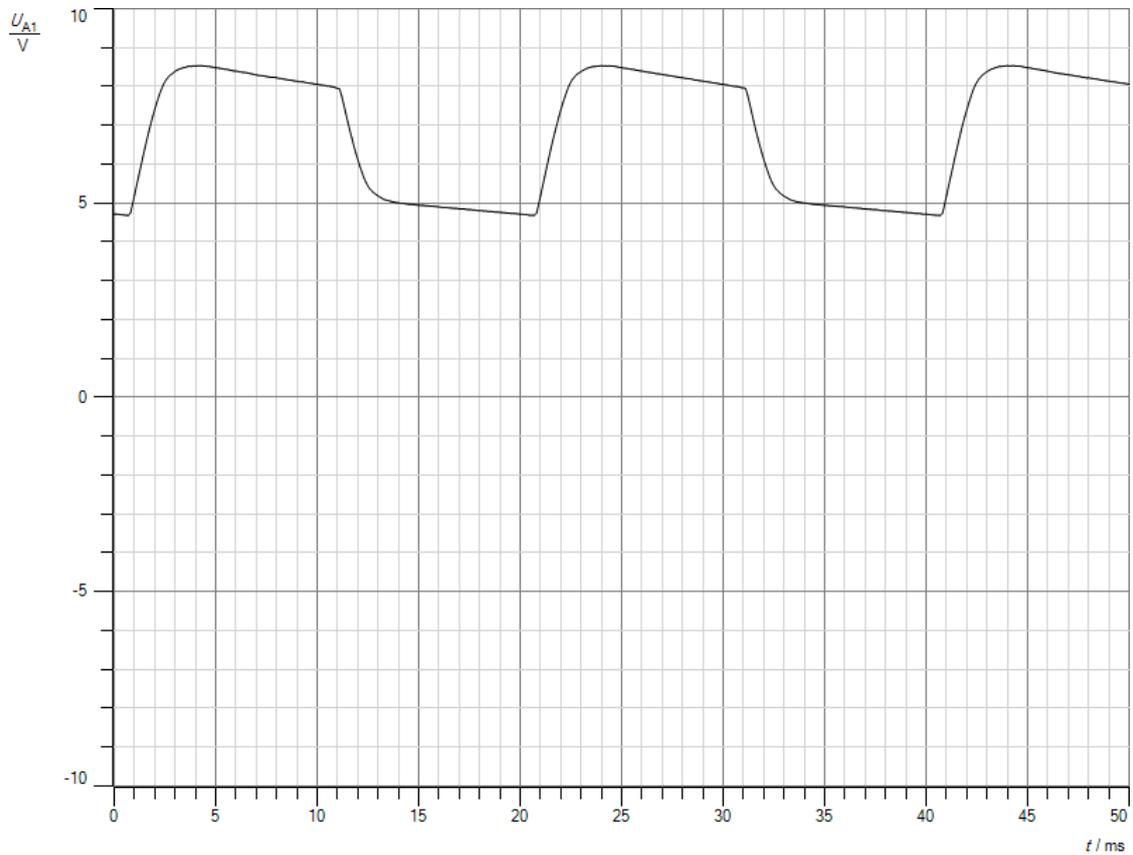


Abb. 9d: Spannungsverlauf an C_1 bei großem Messwiderstand

Versuch 5:

Durchführung:

Man stellt in der Schaltung nach Abb. 7 das Potentiometer so ein, dass die Spannung am Voltmeter etwa 5 V beträgt. Dann misst man nacheinander mit cassy mobile die Spannungen an D_1 , D_2 und C_1 . Man wählt im Messmenü von cassy folgende Einstellungen: Aufnahme: automatisch, Messzeit: 50 ms, Intervall: 100 μ s, Trigger: U_A , 0 V, Δ , $t_0 = 0$. Im Spannungsmenü U_A schaltet man die Optionen Erfassung auf Momentanwerte und Bereich auf -10 V - +10 V um. Beachten Sie die jeweilige Polung von cassy in Abb. 10. Anschließend ändert man im Startmenü von cassy die Option Aufnahme in wiederholend, deaktiviert den Trigger und dreht am Potentiometer.

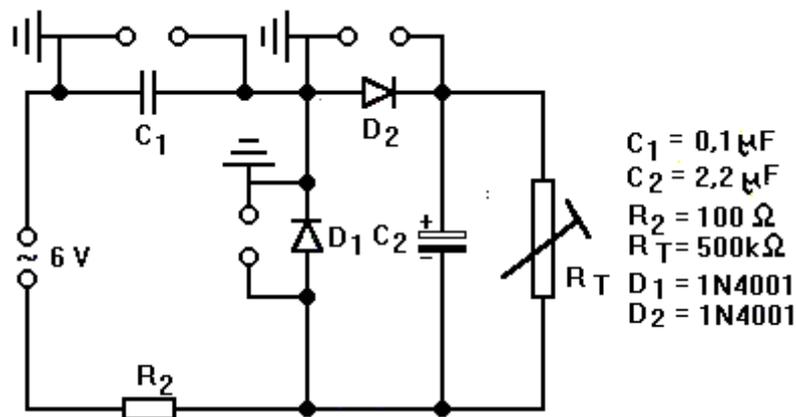


Abb. 10: Polung der Messspannungen mit cassy

Beobachtung:

Man erhält mit cassy die Kurven in Abb. 9 a-d.

Folgerung:

Deutlich erkennt man, dass die beiden Dioden wechselseitig durchschalten, wobei die Sperrspannung einmal positiv und einmal negativ ist, da sie in unterschiedlichen Halbperioden sperren. Außerdem bestätigt der Kurvenverlauf an C_1 die obige Erklärung des Kaskadengleichrichters. 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 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.

Bleibt nur noch eine Frage offen, nämlich die Frage, welche Bedeutung der Widerstand R_1 in Abb. 1 hat. Dazu bieten sich ein **nicht ungefährlicher**, aber sehr aufschlussreicher **Lehrerversuch** oder aber ein ungefährlicher Schülerversuch an.

Versuch 6: (Lehrerversuch!!!)

Durchführung:

Man lötet in der Schaltung des Ladeteils nach Abb. 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 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

$$\tau = R_1 * C_1 = 0,18s$$

gelingt die Entladung innerhalb einer Sekunde auf ungefährliche

$$U(t) = U_0 * e^{-\frac{t}{\tau}} = 325V * e^{-5,56} = 1,3V.$$

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

$$U_0 = \sqrt{2} * U_{eff} = \sqrt{2} * 230V = 325V.$$

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

- 1) er parallel und nicht in Reihe zum Kondensator C_1 geschaltet ist und
- 2) kaum zur Impedanz des RC-Gliedes beiträgt.

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

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

Mit

$$R = 820k\Omega$$

und

$$R_C = \frac{1}{\omega * C} = \frac{1}{2\pi * 50Hz * 0,22\mu F} = 14,5k\Omega$$

folgt:

$$Z = 14,5k\Omega.$$

Die Aufgabe von R_1 lässt sich auch mit der Schaltung für die Schüler nach Abb. 7 gefahrlos demonstrieren.

Versuch 7:

Durchführung:

Die Schüler entfernen aus der Schaltung nach Abb. 7 das Voltmeter, stellen das Potentiometer auf $500\text{ k}\Omega$ ein, betreiben sie kurz mit $U = 6\text{ V}$ und schalten die Betriebsspannung aus. Danach schließen sie an C_1 ein Voltmeter an. Anschließend 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 Spannungsstoß 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 Bürste

Eine Analyse der Platine der Bürste liefert den Schaltplan in Abb.1.

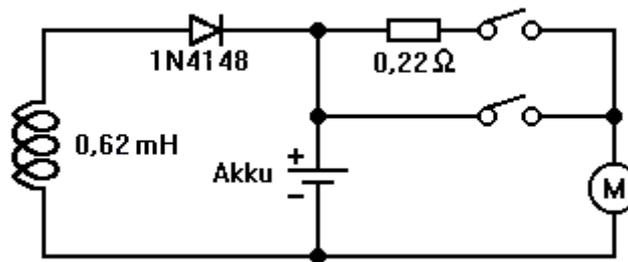


Abb.1: Schaltplan der Bürste

Daraus geht hervor, dass die Bürste weit weniger kompliziert aufgebaut ist als das Ladeteil. Ihre Funktion können die Schüler selbst erarbeiten. Die wesentlichen Punkte lassen sich wie folgt kurz zusammenfassen. Die in der Spule induzierte Spannung von einigen Volt wird über die Diode gleichgerichtet. Sie ist so gepolt, dass der Akku zwar über sie geladen werden kann, sich jedoch nicht über die Spule wieder entladen kann. Der Akku ist für $U = 1,2 \text{ V}$ 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 $U = 1 \text{ V}$. Somit gelten folgende Beziehungen:

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

$$1\text{V} = R_M * I_2$$

und

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

Darin bedeuten:

I_1 : Stromstärke im Schnelllauf,

I_2 : Stromstärke im Langsamlauf und

R_M : Widerstand des Motors.

Aus diesen Gleichungen folgt:

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

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

$$R_M = 1,1\Omega$$

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

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

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 handelsübli-

chen Ohmmeter überprüfen, da er aus einer Spule besteht, die auch einen induktiven Widerstand besitzt. Bei den meisten modernen Ohmmetern wird der Messspannung eine Wechselfrequenz 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 mit 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:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{1700}{2500} = 0,68$$

und

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{0,91W}{1,32W} = 0,69.$$

Beide Quotienten stimmen sehr gut überein.

Man kann mit der Empfangsspule der Bürste eine LED oder einen kleinen Solarmotor antreiben. Dazu lötet man sie aus der Bürste aus und setzt sie in die folgende Schaltung ein.

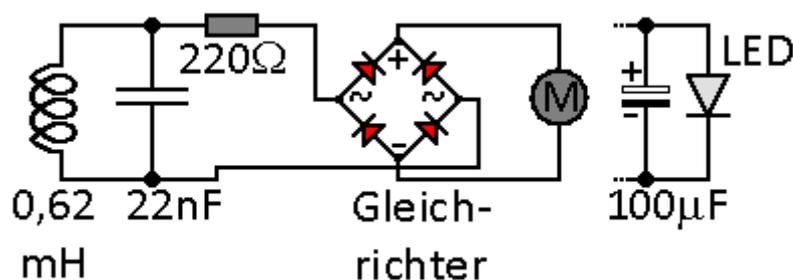


Abb. 2: Empfangsschaltung

Versuch 1a:

Durchführung:

Man baut die Schaltung in Abb. 2 zunächst mit LED, aber ohne Kondensator $C = 22 \text{ nF}$ auf. Man schließt cassy an die Spule an. Man wählt im Messmenü von cassy folgende Einstellungen: Aufnahme: automatisch, Messzeit: $200 \mu\text{s}$, Intervall: $2 \mu\text{s}$, Trigger: aus. Im Spannungsmenü U_A schaltet man die Optionen Erfassung auf Momentanwerte und Bereich auf $-10 \text{ V} - +10 \text{ V}$ um. Dann verbindet man das Ladeteil mit der Steckdose und startet die Messung. Man schaltet cassy im Spannungsmenü auf Effektivwerte um und wiederholt die Messung. Man

schließt den Kondensator an und führt beide Messungen erneut durch. Man ersetzt die LED durch den Motor und wiederholt alle Messvorgänge.

Beobachtung:

Ohne Kondensator erhält man die Kurven in Abb. 2 und Abb. 4. Die Effektivspannung mit LED beträgt $U_{\text{eff}} = 6,6 \text{ V}$ bzw. mit Motor $U_{\text{eff}} = 6,3 \text{ V}$. Mit Kondensator misst man die Kurven in Abb. 3 und 5. Es ergibt sich mit LED eine Effektivspannung $U_{\text{eff}} = 7,5 \text{ V}$ bzw. mit Motor $U_{\text{eff}} = 7,3 \text{ V}$. Mit Kondensator leuchtet die LED merklich heller und der Motor läuft schneller.

Erklärung:

In der Empfangsspule wird eine Spannung induziert. Ohne Kondensator schwingt sie nicht optimal mit dem Sender im Ladeteil mit. Die Schwingung ist verzerrt und die Frequenz ist kleiner als die Sendefrequenz. Aus den Kurven 2 und 4 erhält man eine Periodendauer $T = 30 \mu\text{s}$ und damit für die Frequenz $f = 33,3 \text{ kHz}$. Mit parallel geschaltetem Kondensator (s. Abb.3 und 5) ergibt sich eine Periodendauer $T = 26,6 \mu\text{s}$ und eine Frequenz $f = 37,5 \text{ kHz}$. Die Schwingung ist sinusförmig. Sende- und Empfangsspule schwingen in Resonanz. Daher ist im zweiten Teilversuch die Effektivspannung größer als im 1. Die Lampe leuchtet heller und der Motor läuft schneller. Für den optimalen Kondensator gilt nach der Thomsonschen Schwingungsformel:

$$C = \frac{T^2}{4\pi^2 * L} = \frac{(26,6\mu\text{s})^2}{4 * \pi^2 * 6,2 * 10^{-4}\text{H}} = 28,9 \text{ nF}.$$

Das würde exakt nur für den unbelasteten Schwingkreis gelten. Das zeigt die folgende Tabelle. Darin ist $U(\text{leer})$ die gemessene Effektivspannung für verschiedene Kondensatoren im Leerlauf ohne Gleichrichter, Vorwiderstand, LED bzw. Motor. Bei $C = 32 \text{ nF}$ ist sie am größten.

C[nF]	0	10	22	32	47
U(leer)[V]	7,5	12,1	13,2	18,2	14,3
U(LED)[V]	6,6	9,5	7,5	5,4	7,2
U(M)[V]	6,3	10,2/8,1	7,3	4,7	7,1

Wird der Schwingkreis gemäß der Schaltung in Abb. 2 belastet, so ergibt sich ein völlig anderes Bild. Man erhält für die Effektivspannungen die Werte in der dritten und vierten Zeile. Der Motor läuft am schnellsten mit $C = 10 \text{ nF}$ und am langsamsten mit $C = 32 \text{ nF}$. Nach kurzer Laufzeit bleibt er bei $C = 32 \text{ nF}$ nach dem Anstoßen sogar stehen. Bei $C = 10 \text{ nF}$ pendelt die Geschwindigkeit zwischen zwei Stufen hin und her, die Effektivspannung schwankt erstaunlicherweise zwischen $8,1 \text{ V}$ und $10,2 \text{ V}$. Auch die LED leuchtet bei $C = 32 \text{ nF}$ am schwächsten und bei $C = 10 \text{ nF}$ am hellsten. Man sieht, im belasteten Zustand sind die Verhältnisse komplizierter als die einfache Anwendung der Thomsonschen Schwingungsformel aussagt. Häufig enthalten Geräte versteckte Kapazitäten und Induktivitäten, die in die Berechnung mitgehen müssten. Das gilt mit Sicherheit für den Motor, da er eine Ankerspule besitzt.

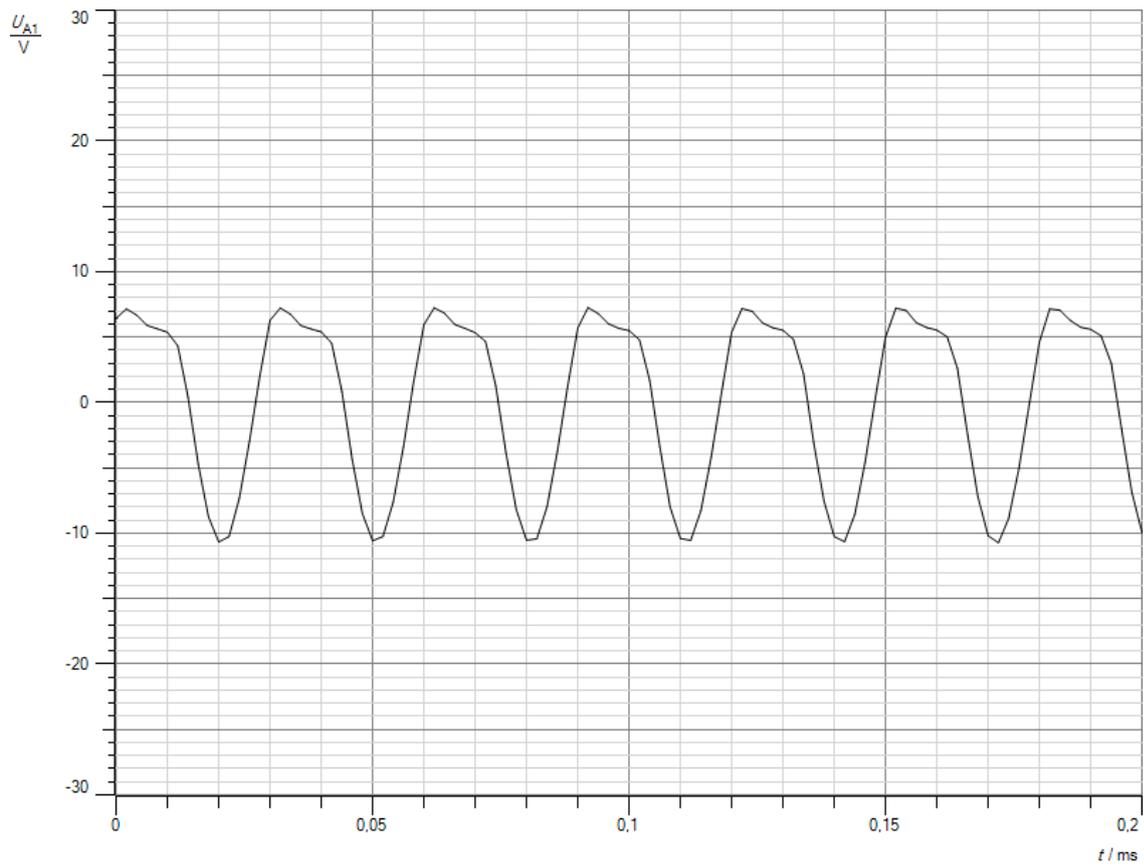


Abb. 2: Spannungsverlauf mit LED ohne Kondensator

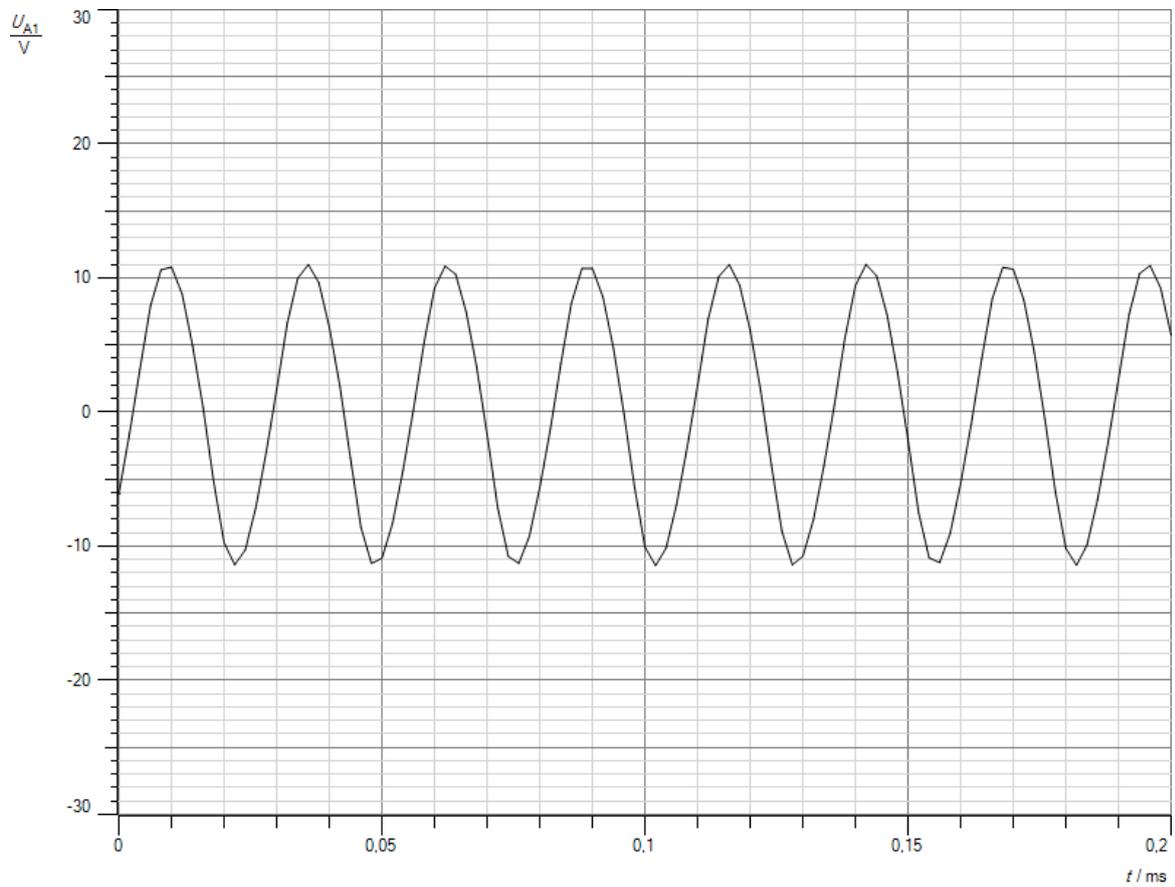


Abb. 3: Spannungsverlauf mit LED und Kondensator $C = 22 \text{ nF}$

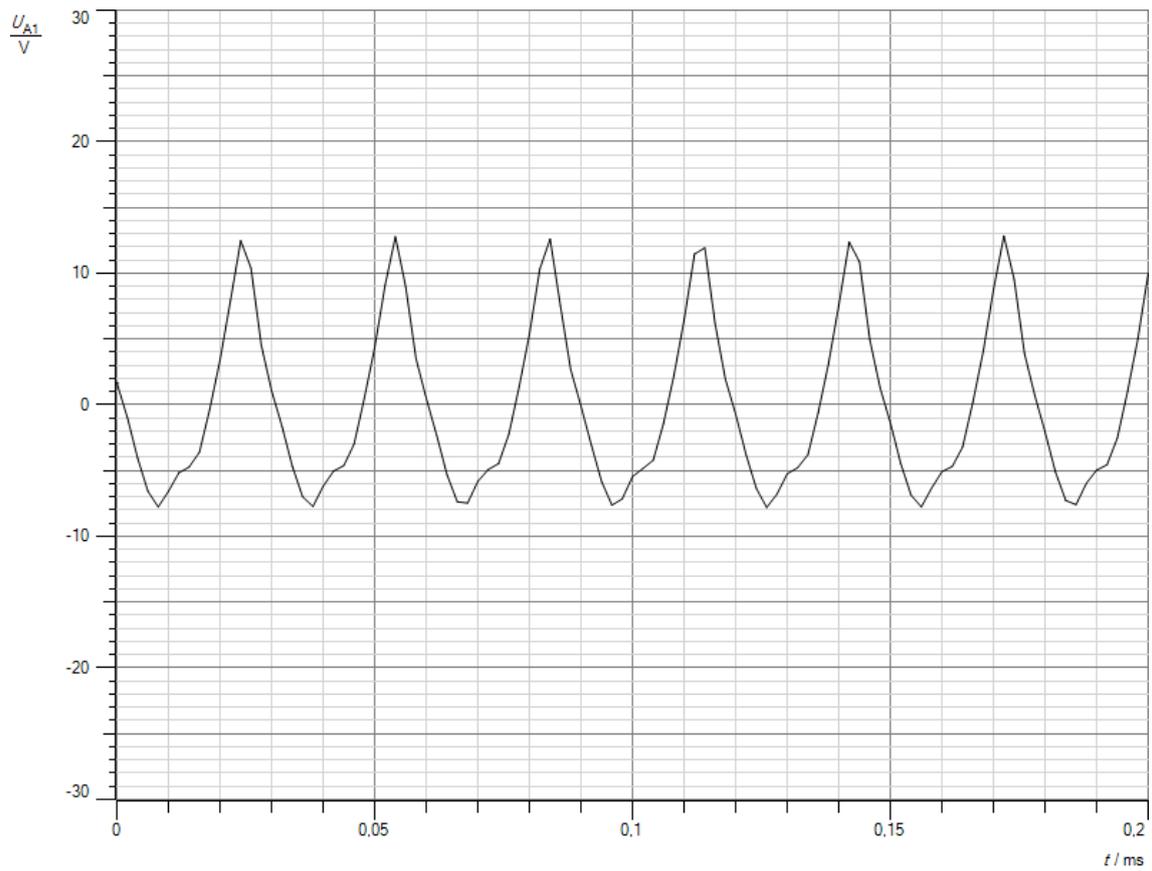


Abb. 4: Spannungsverlauf mit Motor ohne Kondensator

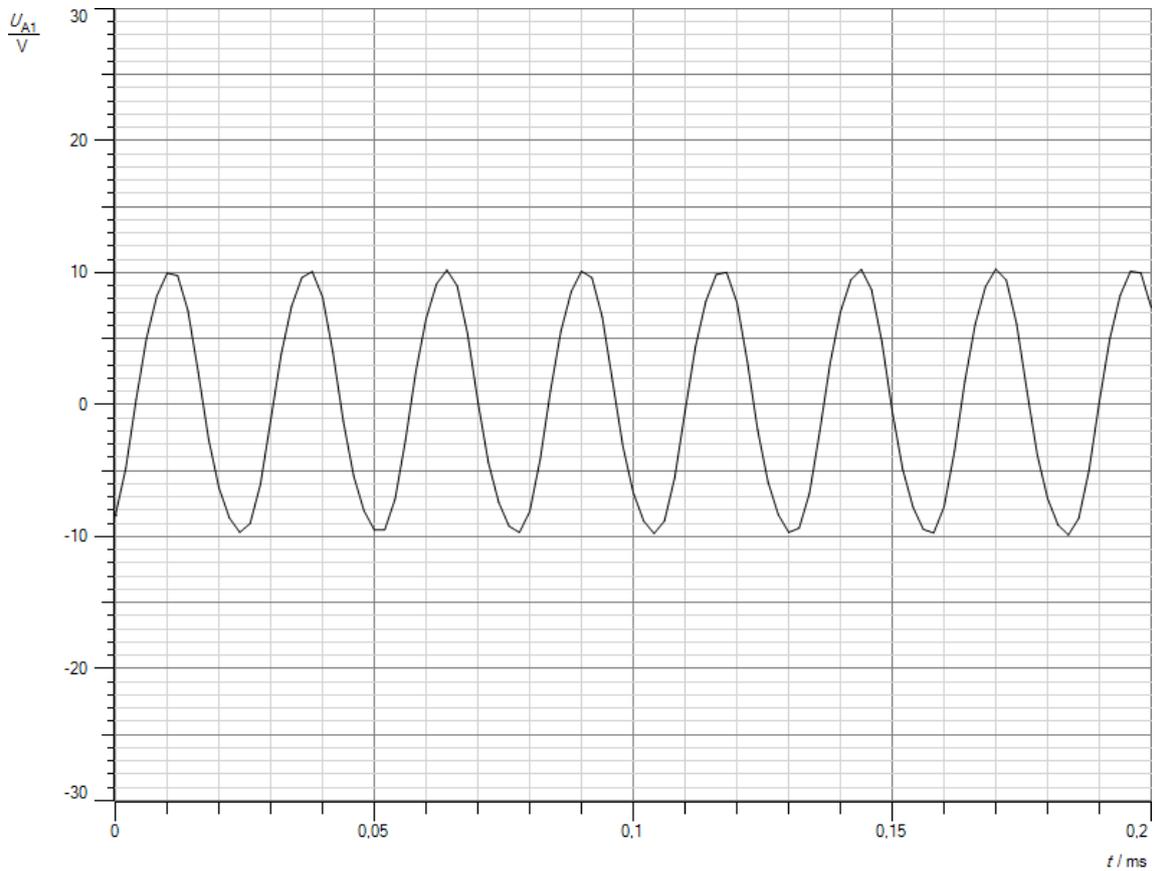


Abb. 5: Spannungsverlauf mit Motor und Kondensator $C = 22\text{nF}$

5.Zahnbürstenradio

Oszillatoren werden auch verwendet, um statt Energie Informationen zu übertragen, z.B. beim Radio, WLAN oder Funkkopfhörer. Ganz interessierte Schülerinnen und Schüler können das Ladeteil mit wenigen Bauteilen nachbauen und damit Musik auf einen einfachen Demodulator übertragen und hörbar machen. Man benötigt die Sendeschaltung bzw. Empfangsschaltung in Abb. 1 und 2. Die Sende- und Empfangsspule kann man sich aus einer alten Zahnbürste ausbauen oder sich vergleichbare Spulen im Elektronikhandel besorgen. Als Tonquelle benutzt man den Kopfhörerausgang eines Audiogerätes, eines Radios, Smartphones, oder Tonfrequenzgenerators.

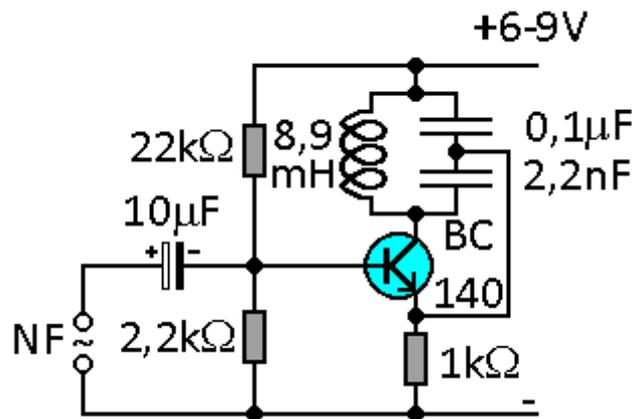


Abb.1: Audiosender

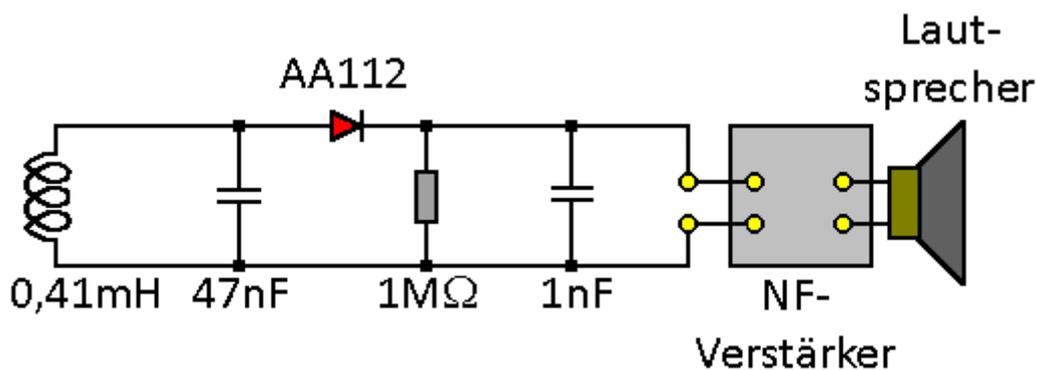


Abb.2: Audioempfänger

Versuch 2a:

Durchführung:

Man baut die Sende- und Empfangsschaltung auf. Als NF-Quelle benutzt man den Ohrhörerausgang eines Audiogerätes. Dann bringt man die beiden Spulen mit den Stirnflächen bis auf eine Entfernung von 1- 2 cm zusammen. Anschließend schiebt man zwischen sie ein Stück Karton oder Holz, die Hand bzw. eine Metallplatte.

Beobachtung:

Man hört aus dem Lautsprecher des Empfangsteils die im Sender eingespeiste Musik. Hält man die Hand oder ein Stück Karton bzw. Holz zwischen die Spulen, so wird die Übertragung nicht gestört. Bei der Metallplatte bricht sie dagegen sofort ab.

Erklärung:

Der Sender strahlt elektromagnetische Wellen ab, die den Empfangskreis durch Induktion zu Resonanzschwingungen anregen. Sie werden gleichgerichtet. Das Trägersignal wird herausgefiltert, die Musikfrequenzen werden verstärkt und durch den Lautsprecher hörbar gemacht. Elektromagnetische Wellen können nichtmetallische Gegenstände problemlos durchdringen. Von Metallteilen werden sie dagegen abgeschirmt.

Versuch 2b:

Durchführung:

Man baut die Sendeschaltung in Abb. 1 auf. Man greift mit einem Messwerterfassungssystem wie cassy mobile die Spannung an der Spule ab. Man wählt im Messmenü von cassy folgende Einstellungen: Aufnahme: automatisch, Messzeit: 200 μs , Intervall: 2 μs , Trigger: U_A . 5V, Δ , $t_0 = 0$. Im Spannungsmenü U_A schaltet man die Optionen Erfassung auf Momentanwerte und Bereich auf -10 V - +10 V um.

Beobachtung:

Man erhält die Messkurve in Abb. 3.

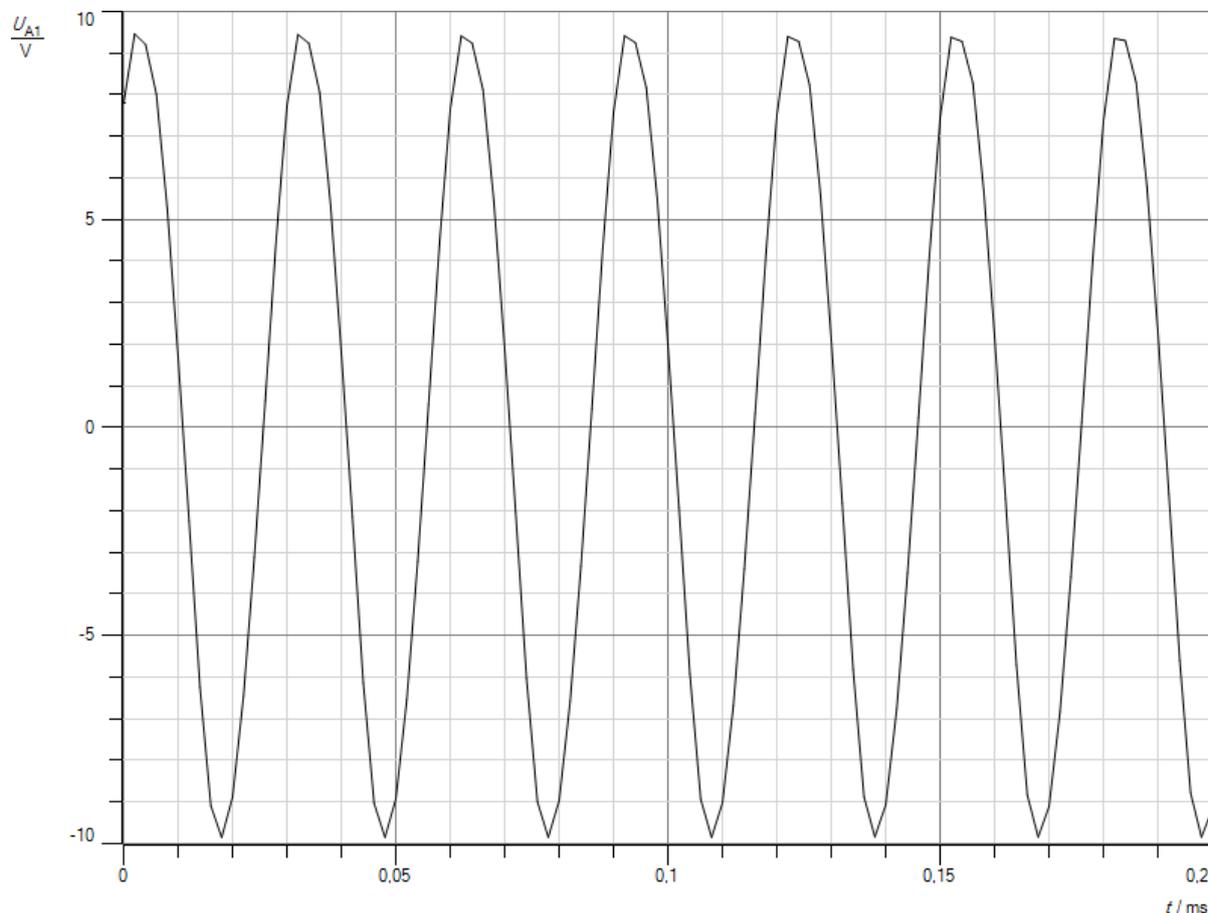


Abb. 3: Entdämpfte Schwingung des Senders

Auswertung:

Man bestimmt die Periodendauer aus der Kurve und erhält:

$$T = 0,03 \text{ ms.}$$

Daraus ergibt sich die Frequenz f zu:

$$f = \frac{1}{T} = 33,3 \text{ kHz.}$$

Ihr theoretischer Wert wurde bereits in Kapitel 4.1 zu

$$f = \frac{1}{T} = 36,4 \text{ kHz.}$$

errechnet. Theoretischer Wert und Messwert stimmen unter Berücksichtigung der Toleranzen der verwendeten Bauteile recht gut überein.

Diese Schaltung bietet wegen der geringen Trägerfrequenz weitere interessante Möglichkeiten. Mit ihr lassen sich die Vorgänge bei der Modulation bzw. Demodulation auch mit cassy mobile, also in Schülerexperimenten, untersuchen. Für Testsender im MW-, KW- oder UKW-Bereich benötigt man einen herkömmlichen Oszillographen mit größerer Zeitauflösung (s. Skript Radio auf dieser Webseite).

Versuch 2c:

Durchführung:

Man baut die Sende- und die Empfangsschaltung in Abb. 1 und 2 ohne Verstärker und Lautsprecher auf. Als NF-Quelle dient ein Recht- oder Sinusgenerator mit $f_{\text{NF}} = 400 \text{ Hz}$. Man wählt im Messmenü von cassy folgende Einstellungen: Aufnahme: automatisch, Messzeit: 20 ms, Intervall: 20 μs , Trigger: U_A , 1- 1,5V, Δ , $t_0 = 0$. Im Spannungsmenü U_A schaltet man die Optionen Erfassung auf Momentanwerte und Bereich auf -3V – +3V um. Man schließt den Spannungseingang von cassy zunächst an die Spule und dann an den NF-Ausgang des Empfangskreises an. Anschließend entfernt man aus der Empfangsschaltung den Kondensator $C = 1 \text{ nF}$. Für alle drei Fälle zeichnet man die Spannung auf. Im 4. Teilversuch vertauscht man die Anschlüsse an der Diode und wählt am Trigger eine negative Vorspannung von - 1- 1,5 V. Man wiederholt die Teilversuche 2 und 3. Im letzten Teilversuch schaltet man den Trigger in cassy aus und ersetzt die Diode durch einen Widerstand mit $R = 100 \text{ k}\Omega$.

Beobachtung:

In den ersten drei Teilversuchen erhält man die Kurven in Abb. 5a-c. Vertauscht man die Anschlüsse an der Diode, so wird der obere Teil der Kurve in Abb. 5a abgeschnitten. Die Messkurven 5b und 5c verlaufen im negativen Bereich. Ersetzt man die Diode durch den Widerstand $R = 100 \text{ k}\Omega$, so erhält man die Kurve in Abb. 5d.

Erklärung:

Das in den Sender eingespeiste Sinussignal moduliert die Amplitude der entdämpften Schwingung des Senders. Im Empfänger regt dieses amplitudenmodulierte Signal den Schwingkreis zu Resonanzschwingungen an (s. Abb. 5a). Das Signal wird durch die Diode gleichgerichtet (s. Abb. 5b) und anschließend durch den Siebkondensator $C = 1 \text{ nF}$ von der Trägerfrequenz bis auf wenige Reste befreit (s. Abb. 5c). So gewinnt man das Sinussignal zurück. Wird das Signal nicht gleichgerichtet, sondern nur von der Trägerfrequenz befreit, so erhält man am Ausgang bis auf ein Rauschen eine Nullspannung (s. Abb. 5d), da die NF-Signale beider Halbwellen um 180° phasenverschoben sind und sich zu jedem Zeitpunkt zu Null addieren (s. Abb. 5a). Alternativ kann man die NF-Signale für beide Polungen der Diode mit cassy lab 2 getrennt aufzeichnen und dann softwaremäßig addieren. Man erhält Abb. 5e. Ohne Gleichrichter kann man das NF-Signal nicht zurückgewinnen.

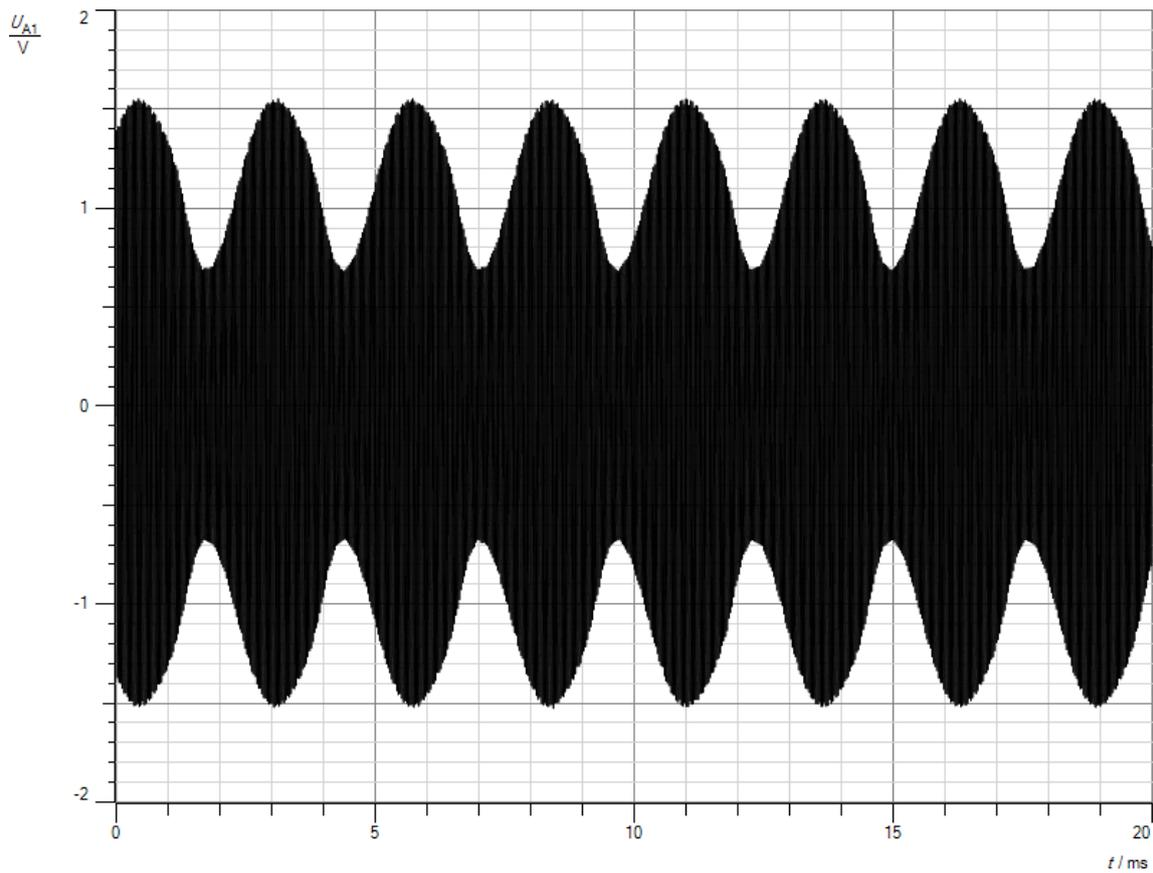


Abb. 5a: Amplitudenmoduliertes HF-Signal

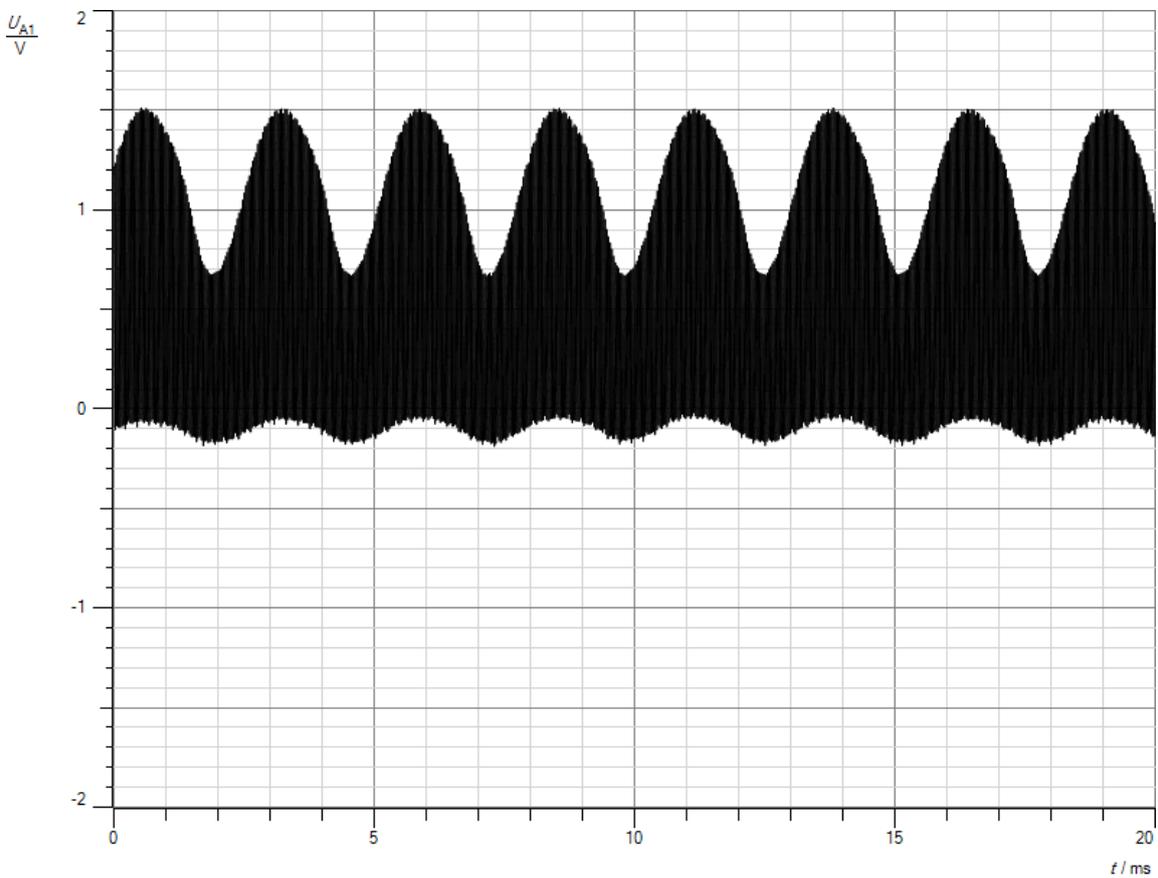


Abb.5b: Gleichgerichtetes HF-Signal

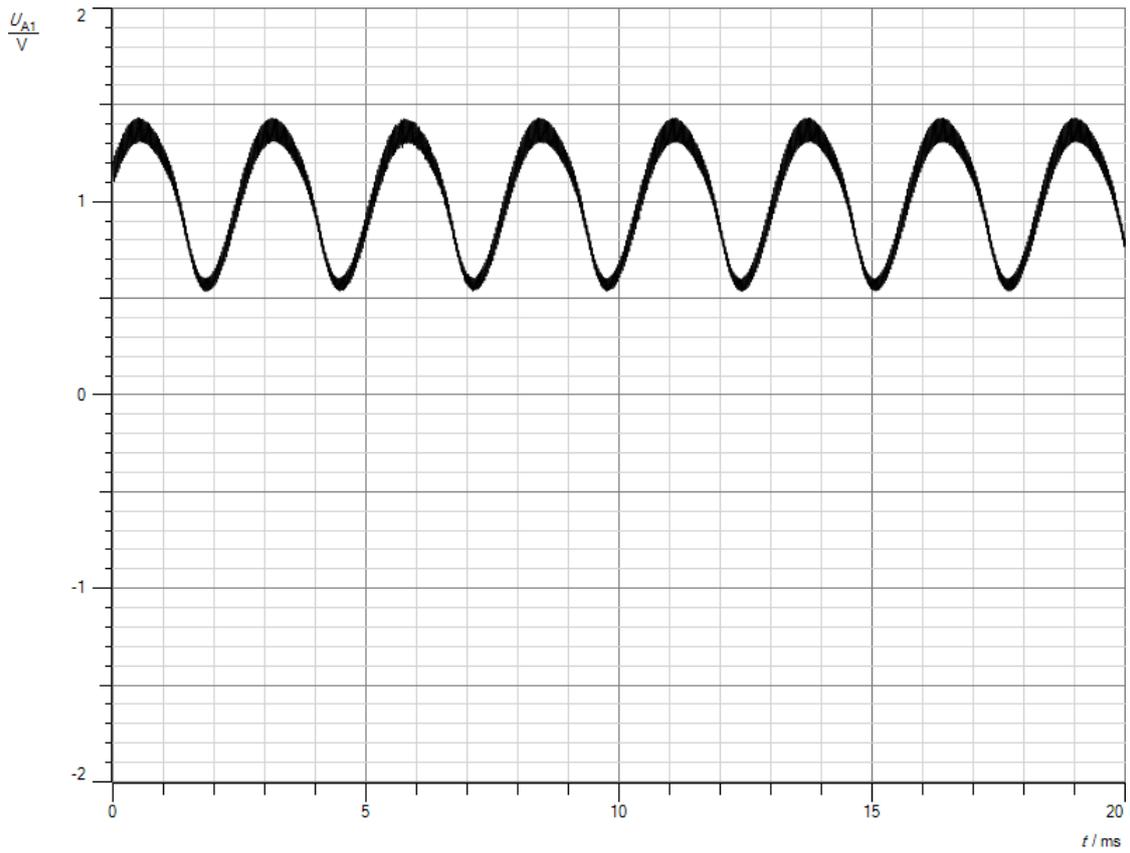


Abb.5c: NF-Signal

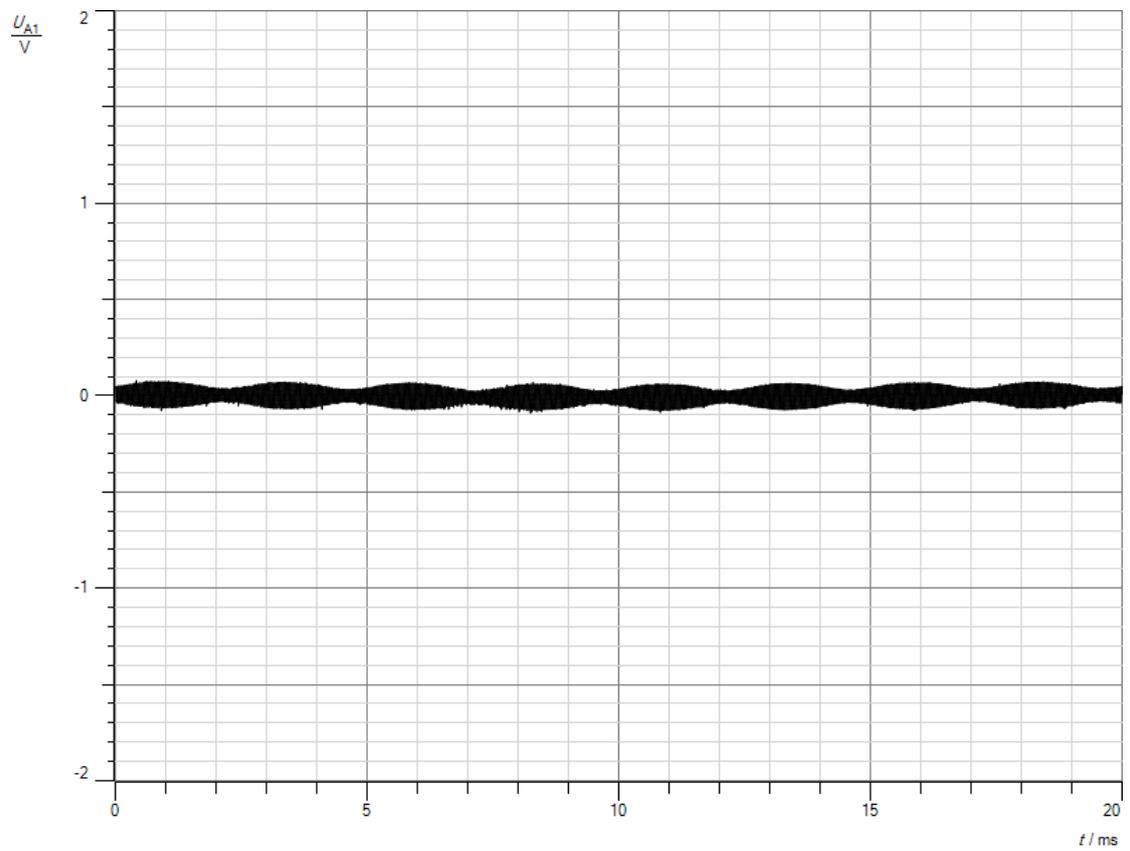


Abb.5d: Spannungsverlauf ohne Diode

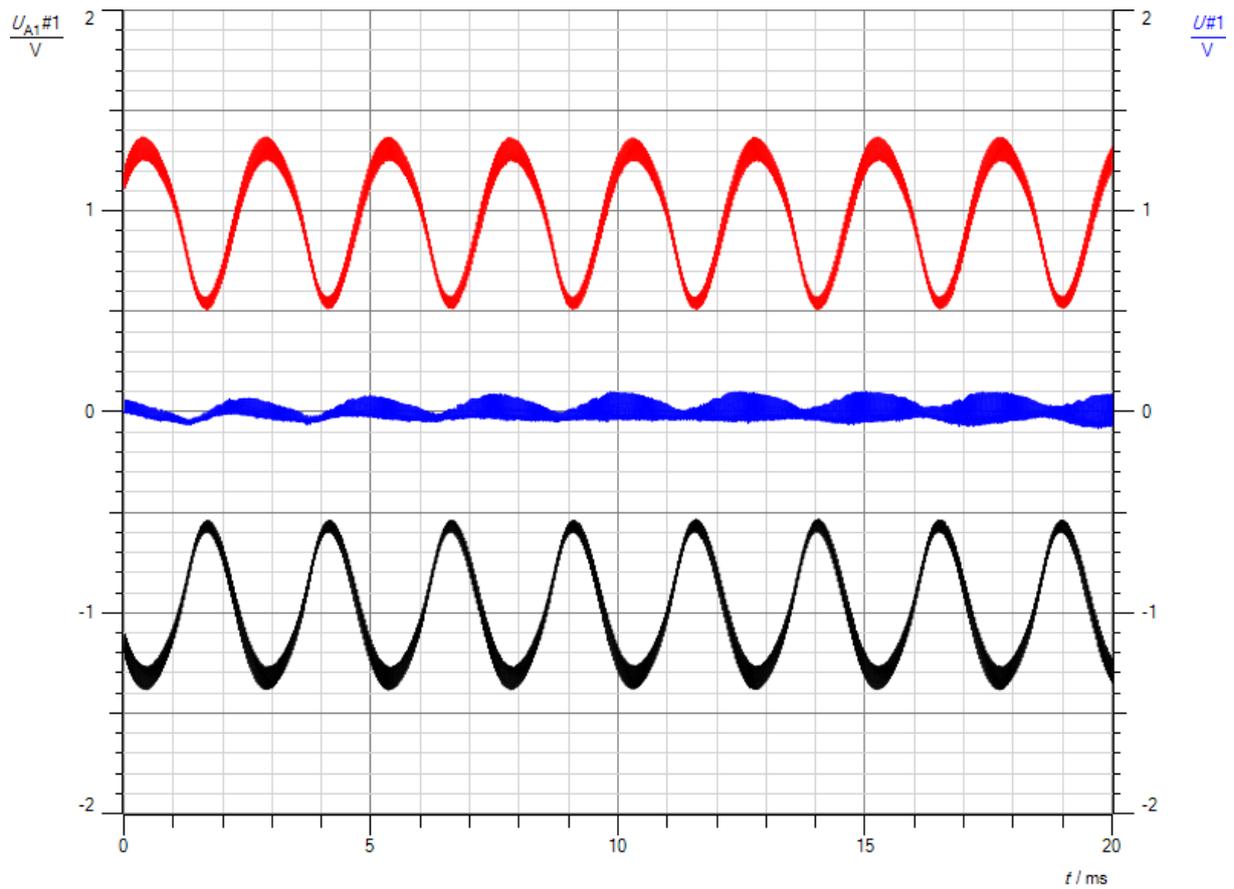


Abb. 5e: Addition der beiden NF-Signale

Führt man den Versuch mit einer Audioquelle wie dem Ohrhörerausgang eines Radios durch, so kann man zeigen, dass die Überlegungen für beliebige Audiosignale gelten. Allerdings verlaufen die Kurven in Bezug auf das NF-Signal nicht mehr synchron, da sie zeitlich versetzt aufgenommen werden müssen, weil cassy mobile nur einen Spannungseingang besitzt.

6. Hochfrequenztrafo

Wäre zum Schluss noch die Frage zu klären, warum der Transformator mit einer für Wechselstrom sehr hohen Frequenz von $f = 37,4 \text{ kHz}$ 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 ein Eisenkern aus. Letztendlich wird die Energie von der Sendespule auf die Empfangsspule durch Induktion übertragen. Für diesen Vorgang gilt das Induktionsgesetz. Es lautet in seiner allgemeinen Form:

$$U_{ind} = -n_s * \frac{d\phi}{dt}$$

$$= -n_s * \frac{d(A * B)}{dt}.$$

Darin bedeutet: Φ magnetischer Fluss, B Magnetfeld, A Fläche der Sekundärspule und n_s Windungszahl der Sekundärspule. Das Gesetz bietet zahlreiche Möglichkeiten, die Induktionsspannung U_{ind} und damit die Leistung P_s in der Sekundärspule zu erhöhen. Man kann ihre Windungszahl n_s , ihre Fläche A oder das Magnetfeld B vergrößern, das sie durchsetzt. Es wird von der Primärspule erzeugt. Für eine kreisrunde Spule mit r als Radius, l als Länge und n_p als Windungszahl gilt:

$$B = \mu_0 * \mu_r * \frac{n_p * I}{\sqrt{r^2 + l^2}}$$

Darin ist I die Stromstärke, μ_0 die magnetische Feldkonstante und μ_r die Permeabilitätszahl des Füllmaterials der Spule. Bei Luftspulen hat sie den Wert 1. Bis auf die magnetische Feldkonstante bieten diese Größen weitere Möglichkeiten, die Induktionsspannung in der Sekundärspule zu erhöhen. Zuletzt kann man die Periodendauer T der an der Primärspule anliegenden Wechselspannung erniedrigen und damit die Frequenz f erhöhen, um die Induktionsspannung zu steigern. Sie ist umso höher, je größer die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses ist. Dass diese Deutung richtig ist, beweist der folgende Versuch.

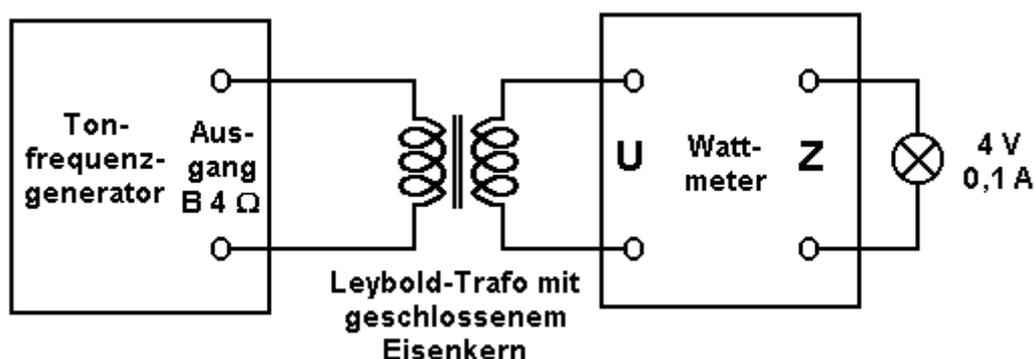


Abb.1: Hochfrequenztransformator

Versuch 1:

Durchführung:

Man baut die Schaltung nach Abb. 1 auf. 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. Man benutzt den Ausgang B für eine Impedanz $Z = 4 \Omega$. An die Sekundärseite wird 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 bei verschiedenen Windungszahlen der beiden Spulen die Frequenz am Tonfrequenzgenerator so ein, dass die übertragene Leistung z.B. 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
$f[\text{Hz}]$	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:

Verringert man die Windungszahlen n_s und n_p der beiden Spulen, so muss man die Frequenz der in die Primärspule eingespeisten Wechselspannung erhöhen, damit die übertragene Leistung einen Wert von z. B. $P = 0,1 \text{ W}$ erreicht. Die Leyboldspulen haben eine große Fläche und sind außerdem mit einem Eisenkern bestückt. Da man in der Zahnbürste eine kleine Sendespule ohne Eisenkern benutzt, damit sie nicht unhandlich wird, muss man die Frequenz der Ladestation entsprechend weiter erhöhen.

7. 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/pdf/radio.pdf, Skript zum Thema Radiosender/Radioempfänger