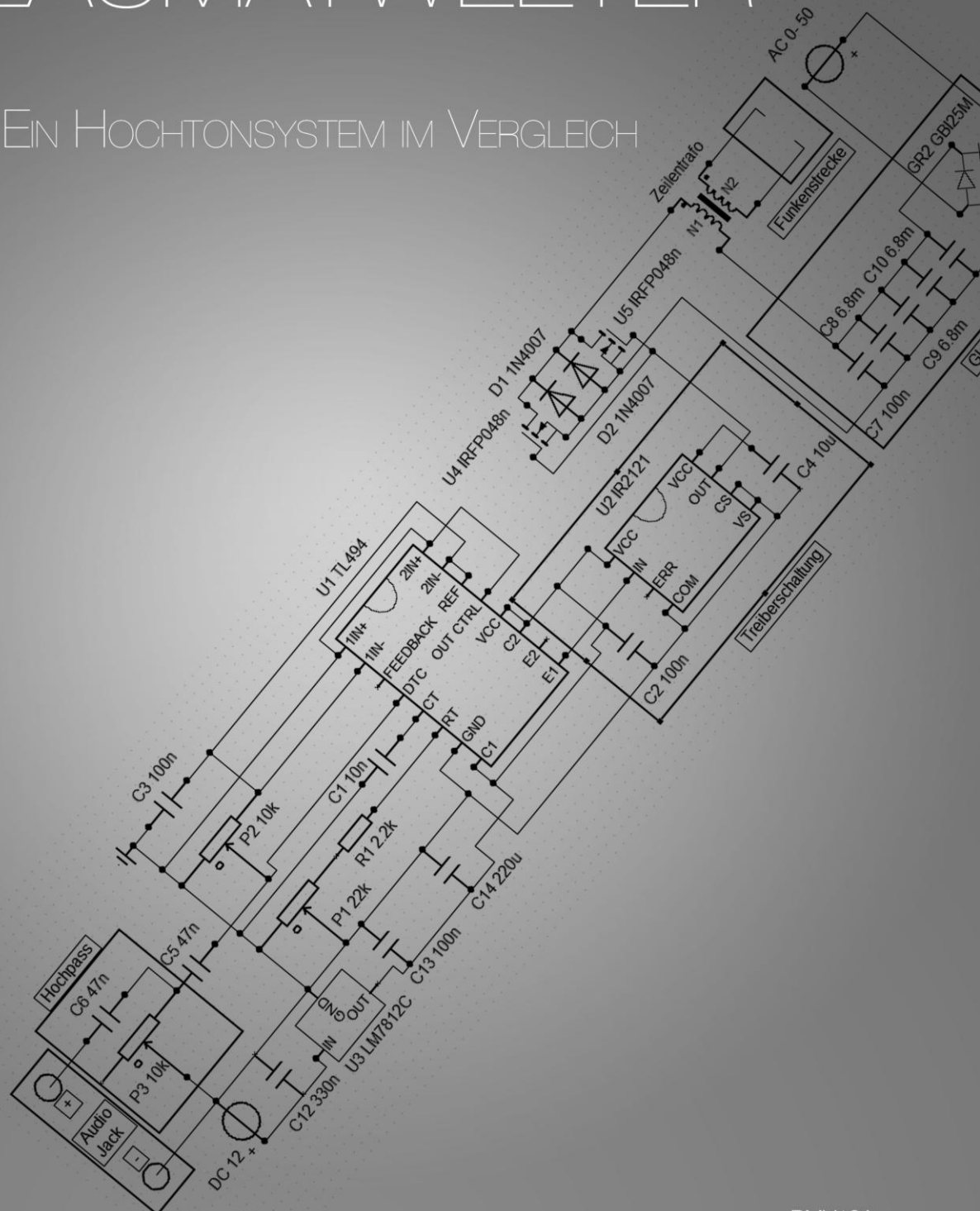


PLASMATWEEETER



Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	3
2	Abstract	4
3	Einleitung	5
4	Funktionsprinzip.....	6
4.1	Schall	6
4.2	Elektroakustischer Wandler.....	7
4.2.1	Elektrodynamischer Lautsprecher.....	8
4.2.2	Plasmatweeter.....	9
4.3	Pulsweitenmodulation PWM.....	10
5	Aufbau	11
5.1	Schaltung eruieren	11
5.2	Bauteile	11
5.2.1	Integrated Circuit TL494.....	11
5.2.2	Treiberschaltung IR2121	11
5.2.3	Festspannungsregler LM7812c	12
5.2.4	MOSFET IRPF048N.....	12
5.2.5	Zeilentransformatoren	12
5.3	Vorgehen	12
5.4	Probleme / Schwierigkeiten.....	15
5.4.1	Steuerelektronik	15
5.4.2	Netzteil	15
5.4.3	Kühlung.....	15
5.4.4	Elektroden	16
5.4.5	Zeilentransformator.....	16
5.4.6	Lüftung und Ozon	16
5.5	Erkenntnisse zur Optimierung der Audioqualität	17
6	Vergleich	18
6.1	Vorgehen	18
6.2	Resultate	18
6.2.1	Auswertung Pulsweitenmodulation.....	18
6.2.2	Auswertung Akustisch	19
6.2.3	Frequenzgang der Lautsprecher	20
6.3	Diskussion	23
7	Schlusswort	24
8	Quellenverzeichnis	25
8.1	Text.....	25
8.2	Bilder	25
9	Anhang	26
9.1	Schema.....	26
9.1.1	Version 1	26
9.1.2	Version 2	27
9.2	Materialliste	28
9.3	Exposé	29
Projektarbeit : Exposé		29
9.3.1		29
9.4	Eidesstattliche Erklärung.....	30

1 Vorwort

„Für mich stand schon von Anfang an fest, dass ich eine praktische Maturaarbeit machen möchte. Meine Interessen liegen im Gebiet der Elektrik und der Elektronik. Für mich war somit klar, dass meine Themengebiete der Arbeit in mein Interessengebiet fallen wird.

Das System Plasmatweeter war mir vor der intensiven Auseinandersetzung noch fremd. Jedoch von Beginn an packte mich das Interesse und ich war fasziniert, wie ein einziger Lichtbogen qualitativ hochstehende Musik abspielen kann. Mein Ehrgeiz und das Experimentierfieber waren geweckt.“

Cyrrill Knüsel

„Bei der Themenwahl der Maturaarbeit war für uns von Beginn an klar, dass wir eine Arbeit mit einem praktischen Hintergrund bevorzugen. Daher haben wir nach einem Projekt gesucht, das auch mit unseren drei Lehrberufen in Zusammenhang stand. Ich berichtete der Gruppe in meiner Lehre Informationen zu einem masselosen Hochtonsystem erhalten zu haben. Nachdem ich erläuterte wie dies funktionieren soll, waren meine Kollegen rasch neugierig. Noch am selben Mittag begannen wir uns Überlegungen zu machen, wie dieses System nun genau funktionieren soll. Das hatte uns so motiviert, dass wir kurzerhand entschieden haben, das Lautsprechersystem zum Untersuchungsgegenstand der Maturaarbeit zu machen. Da das System theoretisch einen Vorteil gegenüber den anderen Lautsprecherarten habe, entschieden wir uns einen Vergleich zu machen. Der objektive Vergleich war relativ schwierig herzustellen, da wir selbst über keine professionellen Hilfsmittel verfügen.“

Mario Fischer

„Die Elektrotechnik hat mich schon immer fasziniert, daher habe ich auch bereits eine Lehre als Automatiker gemacht. Was mich in der Elektrotechnik schon immer besonders gefallen hat, ist die Hochspannung. Daher habe ich mir überlegt eine Taslaspule zu bauen. Dieses Projekt wurde jedoch bereits ein Jahr zuvor durchgeführt. Da ich trotzdem gerne eine Arbeit über Hochspannung verfassen wollte, habe ich mich nach ähnlichen Themengebieten umgeschaut. Dabei kam Mario mit einer Idee, von der ich noch nie gehört habe. Der Plasmatweeter!“

Pascal Jund

2 Abstract

Unter einem Tweeter versteht man in der Fachsprache den Hochtוןlautsprecher eines Musiksystems. Der Plasmatweeter ist Konzept, um die Wiedergabe von Musik im Hochtongebiet ermöglichen zu können. Der Lautsprecher distanziert sich von allen üblichen Systemen, da über keine eigentliche Masse verfügt. Der Schall entsteht direkt am Erzeuger und muss an keine Membrane weitergereicht werden. In dieser Arbeit wird aufgezeigt wie ein Plasmatweeter funktioniert und wie er aufgebaut wird. Nebst dem Entwickeln des Untersuchungsgegenstandes an sich wird das fertige Produkt weiterhin mit einem herkömmlichen Hochtöner akustisch verglichen. Dazu wurde ein geeignetes Schema des Plasmahochtöners entworfen und die Schaltung zusammengebaut. Es wird auf wichtige Faktoren eingegangen, die nötig sind um eine möglichst gute Qualität des Tones zu erreichen. Die ausgegebene Musik wird schliesslich durch Mikrofone aufgenommen und ausgewertet. Dabei stützt sich die Arbeit auf Auswertungen von Tools, die eine objektive Betrachtung des Produktes ermöglichen sollen. Das Ergebnis der Arbeit besteht darin, dass das System sehr wohl funktioniert. Auch wenn gewisse Dinge nicht ideal sind, kann dennoch bei gewissen Vergleichen ein positives Resultat entnommen werden.

3 Einleitung

Ein Plasmatweeter ist ein Lautsprechersystem, das wie andere Systeme Klänge und Töne erzeugen kann. Die Erwartungen an das System sind hoch, denn der Lautsprecher gleicht in der Theorie dem idealen Schallerzeuger nur allzu sehr. In dieser Arbeit soll ein eigens entwickelter Plasmalautsprecher diese Theorie beweisen. Nach der Entwicklung des Produktes soll ein akustischer Vergleich Klarheit darüber liefern, ob das bereits in der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts erfundene Prinzip auch heute noch die Nase vorne hat.

Mit einem Selbstaufbau und anschliessendem Audiovergleich sollen die Probleme und Unterschiede des Vergleichs nicht nur oberflächlich sondern von Grund auf feststellbar sein.

Das System wird in diesen Tagen praktisch in keiner Weise mehr angewandt. Nur noch im absoluten High-End Bereich jenseits der 20'000-Franken-Marke sind solche Lautsprecher zu finden. Ein solches Qualitätsfeld ist für Laien nicht ohne genügend Wissen erreichbar. Daher vergleichen wir das System mit einem Lautsprecher, der sich in der günstigeren Preisklasse befindet. Somit kann auch eine Aussage darüber gemacht werden, ob das Prinzip selbst noch eine Zukunft hat. Problematisch ist, dass die Schaltung viel aufwändiger ist als bei einem elektrodynamischen Lautsprecher. Ein weiteres Problem ist das Ozon, das beim Lichtbogen entsteht. Unsere ersten Versuche stützten wir mithilfe von Schemata aus dem Internet ab. In einem nächsten Schritt soll dann das Schema bestmöglich optimiert werden. Trotz der steigenden Nachfrage nach Luxusgütern, zu denen auch Lautsprecher gehören, ist das Ziel der Arbeit nicht den „ultimativen Lautsprecher“ zu erstellen. Das Ziel ist es schliesslich nicht das Produkt kommerziell zu vermarkten. Es soll mit bereits vorhandenem Wissen und leidenschaftlichem ein Resultat erzielt werden, welches die Vorteile oder Nachteile des Systems akkurat und möglichst objektiv veranschaulicht.

4 Funktionsprinzip

4.1 Schall

Unter Schall wird die wellenartige Ausbreitung eines Druckunterschiedes verstanden. Die Quelle des Schalles erzeugt durch einen Über- und nachfolgenden Unterdruck eine Welle, welche sich über die Luft ausbreitet. Diese Welle bewegt sich ähnlich einer Welle im Wasser mit einer definierbaren Geschwindigkeit aus. Mithilfe des Ohres als Sinnesorgan kann der Mensch die Welle erfassen und im Gehirn verarbeiten.

Schall benötigt im Gegensatz zu Radiowellen (elektromagnetische Wellen) immer ein Trägermedium wie die Luft. Die Welle breitet sich von Luftmolekül zu Luftmolekül analog dem Wasser aus. Im Vakuum existiert demnach kein Schall, da sich dort keine Luft und somit keine Trägerteilchen befinden. Er dehnt sich des Weiteren je nach Medium mit einer unterschiedlich grossen Geschwindigkeit aus. In der Luft beträgt diese ca. 330m/s wobei Temperatur und Luftdruck den Wert beeinflussen können.

Eine Abfolge von Wellen mit konstanter Frequenz wird als Ton bezeichnet. Entgegen des Volkstümlichen Gebrauchs des Wortes „Ton“ besteht dieser im physikalischen Sinne aus genau einer Frequenz und wird mit keiner anderen Welle gemischt. Es kann also genau bestimmt werden, welche Frequenz der Ton hat. Wird ein Ton mit einem Ton anderer Frequenz gemischt, bezeichnet man dies im akustischen Sinne als Klang. Dieser ist gleich dem Ton stets periodisch und folgt somit immer dem gleichen Muster. Als Beispiel dient hier der Klang eines Klaviers beim Drücken einer Taste. Der Klang verändert Charakteristik und Tonhöhe nicht, nur die Lautstärke nimmt mit der Zeit ab. Ein Geräusch hingegen ist eine nichtperiodische Abfolge von Tönen, welche sich in Amplitude (Lautstärke) und Frequenz stetig ändern. Das Geräusch ist daher unregelmässig und folgt keiner Gesetzmässigkeit. Ein extrem kurzzeitiger Anstieg des Druckes wird als Knall bezeichnet. Der Knall klingt nach dem Erzeugen sofort ab und schwingt ähnlich einem Pendel aus.

In unserem Sinnesumfeld spielt Schall eine sehr grosse Rolle. Bei einem Kinofilm werden fast zwei Drittel der Eindrücke durch den Ton vermittelt. Diese Wahrnehmung wird durch Lautstärke, Tonhöhe und in den meisten Fällen auch durch die Richtung des Geräusches beeinflusst. Ein Geräusch kann im Menschen Urinstinkte wecken und somit die unterschiedlichsten Emotionen hervorrufen. Ein Knall des Blitzes eines nahenden Gewitters oder das Knistern eines Feuers wird in unserem Gehirn sofort mit einem inneren Bild assoziiert. Der Mensch kann sich anschliessend entsprechend verhalten. Damit dies gelingt ist es wichtig, dass man sich im Raum auch ohne das Sehen orientieren kann. Das menschliche Gehör ist in der Lage der Person die Quelle eines Schallereignisses mit einer Genauigkeit von wenigen Grad angeben zu können. Dies ist jedoch nur möglich, weil wir zwei Ohren besitzen. Wir nehmen solche Laufzeitunterschiede vom einen zum anderen Ohr bereits ab wenigen Millisekunden wahr. Das Gehirn wertet diese Information aus und ist dann in der Lage den Ursprung mit der Ungenauigkeit von wenigen Grad exakt anzugeben. Bei einem ungeahnten Ereignis drehen wir den Kopf dann automatisch in richtige Richtung, auch wenn wir die Quelle nicht direkt sehen können. Zu beobachten ist dies als Fussgänger bei einem von hinten nahenden Auto. Obwohl es noch nicht im Sichtfeld erscheint, wissen wir bereits im Voraus in etwa wo es sich befindet. Wenn wir jedoch Kopfhörer tragen und Musik hören, ist dies nicht mehr möglich und wir werden vom Auto, welches plötzlich an einem vorbeifährt, überrascht sein.

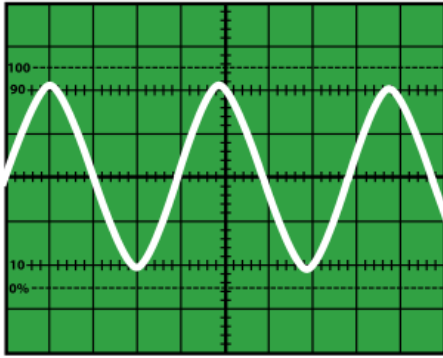


Abb. 4-1: Ton in Form einer Sinusschwingung

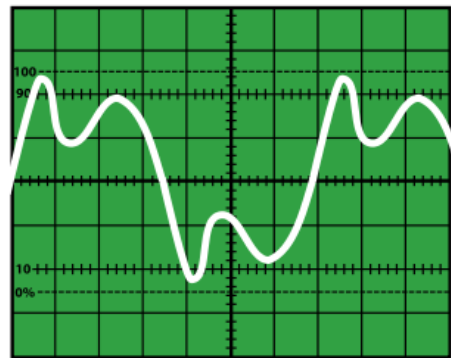


Abb. 4-2: Ein Klang mit mehreren Oberwellen

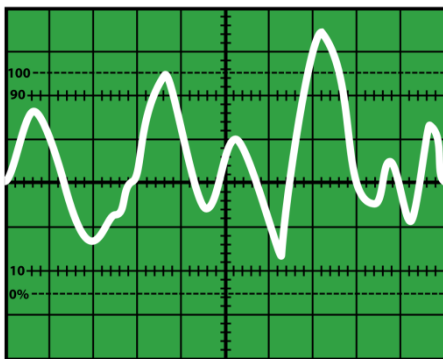


Abb. 4-3: Geräusch (unregelmässige Schwingung)

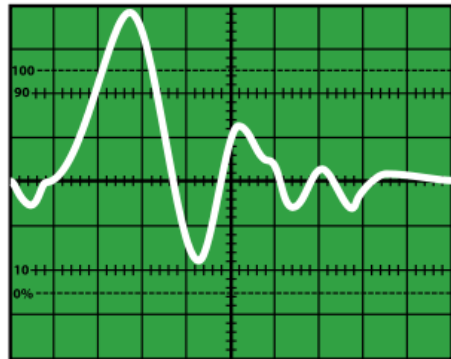


Abb. 4-4: Knall mit zugehörigem Auspendeln

4.2 Elektroakustischer Wandler

Nachdem es über eine lange Zeit hinweg nicht möglich war, Schall zu „speichern“, wurde in den beiden letzten Jahrhunderten stark an Methoden geforscht um Schall auf einem Datenträger speichern zu können um es an einem späteren Zeitpunkt wiederzugeben.

Wandler, welche den Schall aufnehmen und auf einen Träger bringen werden als Mikrofone bezeichnet. Wandler, welche die Informationen auf dem Träger zurück in Schall umformen, werden Lautsprecher genannt.

Elektroakustische Wandler erwiesen sich als ideale Schallwandler um Sprache und Musik auf ein Medium zu bringen. Die Schwingung des Schalles wird dabei in Elektrizität umgewandelt und anschliessend auf einen Träger wie z.B. dem analogen Tonband oder der digitalen CD gebracht. Mit einem Lesegerät wird der Träger ausgelesen und die Information über die Elektrizität zu Schall gewandelt. Dabei gibt es diverse Varianten um die elektrische Schwingung zurück in eine akustische Schwingung zu bringen.

4.2.1 Elektrodynamischer Lautsprecher

Der elektrodynamische Lautsprecher ist die häufigste Form des elektroakustischen Wandler und wird im allgemeinen dem klassischen Lautsprecher gleichgesetzt. Die Bauform ermöglicht es ein elektrisches Signal mithilfe des Elektromagnetismus in Schall umzuwandeln. Dabei wird eine Spule, die sogenannte Spinne in einen Dauermagneten eingebracht. Zwischen dem Magneten und der Spule befindet sich ein kleiner Luftspalt, wodurch die Spule nach vorne und hinten frei beweglich ist. Wird nun eine Spannung an die Spule angelegt, entsteht um sie ein magnetisches Feld. Je nach Polung der Spannung zieht das Feld die Spule nach hinten oder stösst diese nach vorne ab. Legt man nun eine Sinusschwingung an die Spule, bewegt sie sich im selben Rhythmus nach vorne und nach hinten. Eine Membran, welche am offenen Ende der Spinne befestigt wird, bewegt nun die Luft im selben Takt. Der Über- und Unterdruck, der folglich entsteht, kann nun als Schall wahrgenommen werden.

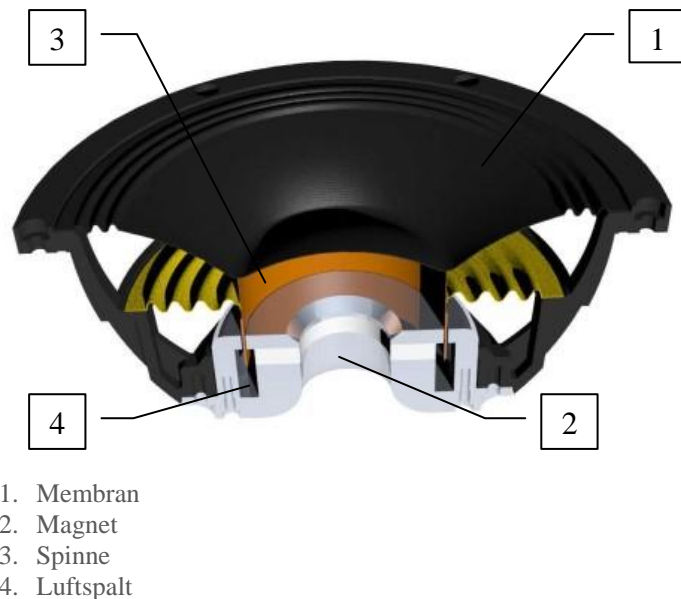


Abb. 4-5: Querschnitt durch einen Lautsprecher

Diese theoretisch einfache Apparatur ist in der Praxis schwierig herzustellen. Bewegliche Teile reagieren in der Mechanik nicht immer dem Ideal entsprechend und verzerren daher das Signal, oder die ursprünglich gewollte Bewegung. Als besonders problematisch werden hierbei vor allem die höheren Frequenzen erachtet, was gerade die vielen technologischen Weiterentwicklungen im Hochtonsektor begründen kann. Durch die besonders schnellen Schwingungen, welche sich im zweistelligen Kilohertzbereich befinden (d.h. die Membran schwingt innert einer Sekunde mehrere zehntausend Mal nach vorne und nach hinten) machen sich auch immer mehr negative physikalische Effekte bemerkbar. Ein wichtiger negativ-Effekt ist die Verformung des Materials. Die schnellen abwechselnden Bewegungen verursachen starke Trägheitskräfte an der Membran, weil die Beschleunigung in entgegengesetzte Richtung mit höherer Frequenz stärker zunimmt. Die Membran erfährt dabei so grosse Kräfte, dass das Material sich zu verformen beginnt und beispielsweise bei einem Richtungswechsel auseinandergezogen oder zusammengestaucht wird. Für uns als Hörer werden solche Effekte als Verzerrungen wahrgenommen. Der Klang beginnt zu klirren und die Qualität nimmt ab. Die Effekte gehen so weit, dass sehr hohe Frequenzen am Rande des menschlichen Hörens nicht oder nur stark abgedämpft wiedergegeben werden. Wir empfinden dann, dass es einer Lautsprecheranlage an Höhen fehlt.

Dass gerade der Hochtonbereich der wichtigste im Hören des Menschen ist, zeigt die Empfindlichkeit des Ohres. Die meisten Geräusche wie die Sprache sind in diesem Segment um 2-5 Kilohertz angesiedelt. Das Gehör hat sich daher auf dieses Frequenzspektrum spezialisiert, was bedeutet, dass wir genau in diesem Bereich am besten hören. Musikanlagen mit guten Höhen nehmen wir als besonders klar wahr. Das Gehör ist ausserdem besonders auf

Verzerrungen und Störungen geschärft. Ein knacksen oder klicken einer Schallplatte nehmen wir intensiver wahr als das Brummen der Platte, auch wenn beide die gleiche Lautstärke haben. Durch Untersuchungen haben Forscher eine allgemeingültige Lautstärkekurve (eine Art Frequenzgang des Gehörs) erstellt, bei der diese Wahrnehmungsunterschiede ausgeglichen werden. Man nennt die Kurve daher auch Kurve gleicher Lautstärke oder Phonkurve.

4.2.2 Plasmatweeter

Wie bereits im vorhergehenden Kapitel angesprochen haben klassische elektrodynamische Lautsprecher Nachteile durch die Massenträgheit bei hohen Frequenzen. Der Plasmahochtöner wie auch der Ionenhochtöner setzen genau bei dieser Problematik an. Sie kommen dem idealen, masselosen Lautsprecher sehr nahe. Beide Systeme machen sich Temperaturveränderungen einer Entladung zu Nutze um Luft zum Schwingen zu bringen. Jedoch unterscheiden sich die Konzepte bei der Art und Weise, wie eine solche Entladung erzeugt wird.

Das Plasmahochtonsystem erzeugt über einer Funkenstrecke eine Entladung. Zwischen der Anode (positiver Pol) und der Kathode (negativer Pol) entsteht bei hoher Spannung ein Funkenüberschlag ähnlich eines kleinen Blitzes. Dieser „Blitz“ erwärmt die umliegende Luft innert wenige Millisekunden auf hohe Temperaturen. Gase wie die Luft verändern ihr Volumen bei Erwärmung und dehnen sich aus. Wird nun ein Funken erzeugt, breitet sich die Luft in unmittelbarer Umgebung des Überschlages wegen der hohen Temperatur aus.

In einem nächsten Schritt wird nun der Überschlag mit einem Signal moduliert. Dies bedeutet, dass des Funkens Intensität verändert wird. Ist die Entladung stärker, wird mehr Luft nach aussen verdrängt. Die bewegte Luftmasse bewegt sich als Druckwelle fort. Wird die Entladung jedoch schwächer, zieht sich die Luft zusammen, da diese weniger stark erwärmt wird. Setzt man diese beiden Regelkreise nun in eine Schaltung um, entsteht der eigentliche Audiomodulator. Das in der Amplitude sich kontinuierlich verändernde Audiosignal wird so umgesetzt, dass die Funkenstrecke im gleichen Masse an Intensität gewinnt, oder an Intensität verliert. Bei einem Plasmatweeter nutzt man dazu die Pulsweitenmodulation. Diese Art von Modulation verändert die Länge eines Pulses, der stets in regelmässiger Frequenz auftritt. Je höher der Wert des abgetasteten Signales, desto länger dauert ein Puls. Weitere Informationen zur Pulsweitenmodulation finden sich im Kapitel 4.4.

Der Ionenhochtöner funktioniert nach einem ähnlichen Prinzip. Der Hauptunterschied befindet sich darin, dass keine direkte Funkenentladung erzeugt wird. Der Ionenhochtöner beruht auf einem sehr starken elektrischen Feld, welches an der Spitze einer Elektrode herrscht. Das elektrische Feld ist aufgrund der hohen Spannung und der kleinen Fläche so stark, dass die Luft ionisiert wird. Die Luftmoleküle werden leitfähig und es kann ein extrem kleiner Strom zur Erde zurückfliessen. In der unmittelbaren Nähe des Feldes jedoch entsteht eine Plasmaflamme, die wiederum die Luft erhitzt. Analog dem Plasmahochtöner wird das Audiosignal so moduliert, dass sich die Flamme in der Intensität verändert. Solche Systeme werden bis heute in Röhrentechnologie gebaut, da sie hohen Spannungen und starken elektrischen Feldern ausgesetzt sind. Diese würden bei modernen Transistoren Störungen verursachen.

Beide Systeme verbindet der Grundgedanke des masselosen Wandlers, wobei es natürlich zu bedenken gilt, dass auch die Luft eine gewisse Massenträgheit aufweist. In der Theorie hat das System dennoch grosse Vorteile, mindestens jedoch genauso viele Nachteile. Als problematisch zu erachten ist der relativ grosse Schaltungsaufwand, der wiederum nie ganz

dem Ideal entsprechen kann und daher auch immer zu gewissen Verzerrungen führt. Um dennoch die hohen Qualitätsansprüche erfüllen zu können, müssen auch hochwertige Bauteile verbaut werden. Dies widerspiegelt sich natürlich auch im Preis. Heutige kommerziell angebotene Lautsprechersysteme, welche auf diese Technologie setzen, beginnen preislich bei ca. 10'000 CHF pro Stück. Die Preise gehen bis über 100'000 CHF hinaus.

Unsere IDPA beruht auf dem Plasmahochtöner. Die verwendete analoge Röhrentechnologie des Ionenhochtöners ist sowohl im Aufbau wie auch im Bezug auf das Verständnis der Funktionsweise komplexer, da Erfahrungen mit dem Umgang der Elektronenröhrentechnologie vorhanden sein sollten. Da wir weder Erfahrungen, noch das nötige Grundwissen über Röhren haben, entschlossen wir uns das System auf der Basis der Pulsweitenmodulation zu entwickeln. Die dabei verwendeten Transistoren sind einfacher anzusteuern und besitzen weniger negative Effekte, die kompensiert werden müssten. Trotzdem ist auch bei diesem System der Schaltungsaufwand für einen Lautsprecher relativ gross!

4.3 Pulsweitenmodulation PWM

Bei der Pulsweitenmodulation wird ein konstantes Sägezahnsignal mit einem Oszillator erzeugt. Die Frequenz des Sägezahnsignals ist die Grundfrequenz für die Abtastung des Signals. Wie im Abbild. 4-7: Funktion einer Pulsweitenmodulation“ zu sehen ist, wäre es optimal wenn der höchste Wert (Peak) des zu modulierenden Signals (grün) gleich dem höchsten Wert des Sägezahns (blau) entspricht. Dadurch erhält man eine präzisere Abtastung. Jedes Mal wenn das Ursprungssignal (grün) sich mit dem Sägezahn kreuzt, bewirkt dies eine Zustandsänderung beim modulierten Signal. Dieses kennt nur zwei Zustände, ein- und ausgeschaltet. Das heisst, je nach Spannungshöhe des Ursprungssignals verändert sich die Zeit, wie lang der Zustand ein- bzw. ausgeschaltet ist. So stellt die Pulsbreite die Spannungshöhe des Ursprungssignals dar.

Je höher die Frequenz des Sägezahnsignals (blau), desto höher ist die Abtastung des Ursprungssignals und somit erhöht sich die Qualität. Die Abtastung muss gemäss dem Nyquist-Theorem mindestens doppelt so gross sein wie die maximal abgetastete Frequenz des Ursprungssignals.

$$f_{abst} \geq 2 f_{max}$$

Wird dies nicht beachtet, können Scheinfrequenzen entstehen. Dieser Aliaseffekt stört den Audiogenuss stark.

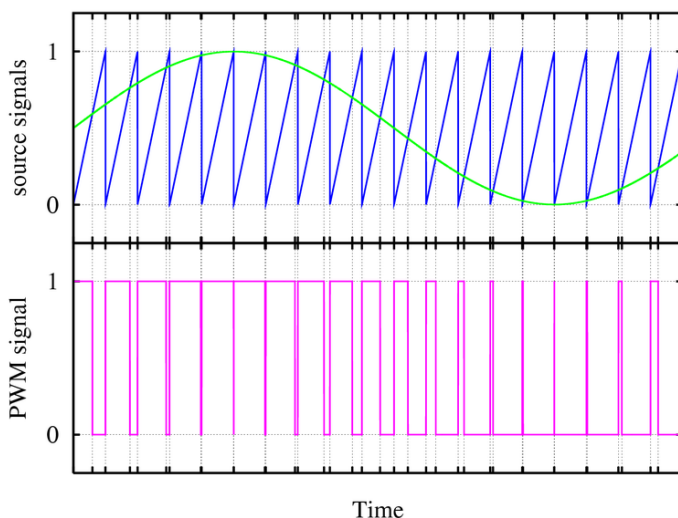


Abb. 4-6: Funktion einer Pulsweitenmodulation

5 Aufbau

5.1 Schaltung eruieren

Einer der ersten Schritte war eine passende Schaltung zu finden um uns mit dem Funktionsprinzip des Plasmatweeter zu vertiefen.

Die Möglichkeit mithilfe eines ICs das Audiosignal in ein pulsweitenmoduliertes Signal umzuwandeln erschien uns sinnvoll. Der vom PWM angesteuerte Leistungstransistor schaltet eine Gleichspannung so, dass an einem in Serie geschalteten Zeilentransfo ein magnetisches Wechselfeld entsteht. An der Anode der Sekundärseite entsteht eine sehr grosse Spannung, die über den Lichtbogen zweier Elektroden zur Kathode abgeleitet wird.

Per Zufall stiessen wir im Internet auf ein Schema, das nach dem Pulsweiten-Prinzip funktioniert. Nun mussten wir uns intensiv mit dem Schema auseinandersetzen, um die eingesetzten Bauteile bzw. die Zusammenhänge zu verstehen, damit wir die nötigen Bauteile bestellen konnten.

5.2 Bauteile

5.2.1 Integrated Circuit TL494

Dies ist ein IC welcher in Kombination von Widerständen und Kondensatoren ein Pulsweitenmoduliertes Signal herausgibt. Der IC arbeitet mit einer Speissspannung von 7-40V und liefert maximal 200mA Ausgangsstrom. Der IC verändert die Länge eines Impulses, der in regelmässiger Frequenz auftritt. Pro Taktsignal geschieht eine Abtastung des Ursprungssignals. Dabei wird die Spannung (Amplitude) des Ursprungssignals gemessen und in die Pulslänge transformiert. Je höher die Spannung am Eingang, desto länger wird der Puls. Mithilfe des Schwingkreises von Widerstand und Kondensator (Pin 5 und 6) wird im Oszillator ein Sägezahn Signal erzeugt welches die Grundfrequenz des Pulsweitensignals darstellt. Je nach Dimensionierung des Widerstandes kann die Frequenz eingestellt werden. Um die Frequenz genau Einstellen zu können, bedient man sich an einem Trimpotentiometer.

Der IC besitzt zwei Signaleingänge (Pin 1/2 ; Pin 16/15) sowie zwei PWM-Ausgänge (Pin 8/9;11/10). Am Eingang kann mithilfe eines Vorwiderstandes der Gleichspannungsanteil des Audiosignals auf das Sägezahnsignal eingestellt werden. Dazu wird dem Audiosignal eine DC-Spannung von Pin 4 so überlagert, dass das Pulssignal sowohl positive, als auch negative Spannungen darstellen kann. Über das Potentiometer P1 kann der Spannungsabfall des Widerstandes eingestellt werden, wodurch sich je nach Einstellung die Spannung am Eingang des ICs verändert.

Der IC besitzt noch weitere Test- und Kontroll-Anschlüsse die wir in unserem Projekt nicht verwendet haben. Die Unbenutzten Eingänge werden auf Masse gelegt, damit keine Störsignale die Funktion des ICs beeinträchtigen können.

5.2.2 Treiberschaltung IR2121

Eine Treiberschaltung ist ein Verstärker. In unserem Fall muss die Schaltung innert kürzester Zeit sehr schnell umschalten können. Das modulierte Pulsweitensignal sollte dabei möglichst exakt abgebildet werden. Der Treiber muss dazu genug Strom liefern um die Gatekapazitäten der MOSFETs umladen zu können. Das zu lange Umladen der Kapazitäten würde ein Verzögern des PWMs verursachen, was einerseits zu Verzerrungen, andererseits jedoch auch zu grösserer Wärmeentwicklung führen kann. Letzteres Problem erklärt sich dadurch, dass sich der Transistor länger im Übergangsbereich befindet, was zu einem höheren

Leistungsabfall am Transistor führen würde. Der Transistor erwärmt sich dabei unnötig stark. Je nach Transistor benötigt man des Weiteren einen anderen Treiber, wobei heutige ICs auf eine Vielzahl von Feldeffekttransistoren abgestimmt sind.

5.2.3 Festspannungsregler LM7812c

Ein Festspannungsregler liefert immer die vordefinierte Spannung solange die Eingangsspannung grösser oder gleich gross ist wie die vordefinierte Spannung. Dies erleichtert den Schaltungsaufwand enorm. In dieser Schaltung liegt die Betriebsspannung bei 12V und die maximale Eingangsspannung beträgt 15V.

5.2.4 MOSFET IRPF048N

Ein Feldeffekttransistor macht sich das Phänomen des elektrischen Feldes zu Nutze. Im Unterschied zu einem Bipolar-Transistor wird der FET nicht mit einem Strom, sondern lediglich mit einer Spannung gesteuert. Der FET kann deshalb theoretisch leistungslos angesteuert werden, wodurch sich Verluste eines äquivalenten Bipolar-Transistors vermeiden lassen würden. Ein MOSFET (Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor) stellt eine spezielle Art des Feldeffekttransistors dar, bei dem die Leitfähigkeit durch eine schmale Elektronenbrücke erzielt wird. Je stärker das elektrische Feld wird, desto mehr Elektronen werden aus dem dotierten Silicium gelöst. Die Brücke kann dabei vergrössert oder bis zur kompletten Auflösung gesteuert werden. In der Praxis fliessen am Gate (Steuerungseingang des Transistors) trotzdem Ströme, da das Gate eine Kapazität aufweist, die geladen oder entladen werden muss. Je höher die Frequenz des Schaltens ist, desto stärker macht sich dieser Effekt bemerkbar. Wie bereits zuvor erwähnt wird daher ein Treiber benötigt. Die verwendeten Transistoren dieser Schaltung zeichnen sich durch niedrige Gatekapazitäten und durch die hohe Strom- und Spannungsfestigkeit aus. Das Gehäuse des FETs ist relativ gross und leitet die Wärme bestens an einen Kühler ab.

5.2.5 Zeilentransformatoren

Zeilentransformatoren sind Transformatoren, die in Röhrenbildschirmen die nötige Spannung zur Ablenkung des Elektronenstrahles erzeugen. Der Zeilentransformator erzeugt über ein hohes Übersetzungsverhältnis eine hohe Spannung bei kleinem Strom. Während in der Vergangenheit meistens auch sekundärseitig die Wechselspannung weiterverwendet wurden, richten heutige Zeilentransformatoren das Signal auf der Sekundärseite gleich. Diese Dioden-Split-Transformatoren sind auf Spannungen der Sekundärseite von bis zu 20 Kilovolt ausgelegt.

5.3 Vorgehen

Der Zusammenbau der Schaltung bereitete uns keine grösseren Schwierigkeiten da wir bereits Erfahrungen mit Schaltungsbau bzw. dem Löten von Bauteilen hatten.

Nach der Überprüfung der Schaltung nahmen wir diese, ohne den Zeilentrafo in Betrieb und begannen die Schaltung mithilfe eines analogen Kathodenoszilloskops die Schaltung zu testen. Dabei entdeckten wir noch einige kleine Fehler, die erfolgreich korrigiert werden konnten.

Als das Ausgangssignal des IC auch einem modulierten Pulsweitsignal entsprach, konnten wir die verschiedenen Auswirkungen testen und am Kathodenoszilloskop betrachten. Des Weiteren konnte die Auswirkungen des Veränderns der Einstellungen des Potentiometers betrachtet werden.

Wie bereits beim Bauelementenbeschrieb erwähnt kann damit zum einen die Lage des Audiosignals auf dem Sägezahnsignal respektive die Pulsbreite gesteuert werden, zum andern die Grundfrequenz des Sägezahnsignals bzw. des Pulsweitsignals.

Nun schlossen wir den Zeilentrafo an die Schaltung an und versuchten einen Lichtbogen zu erzeugen. Das Ergebnis war ernüchternd, der Lichtbogen war max. zwei Millimeter gross. Die Ursache dafür schlossen wir auf die flache Schaltflanke des MOSFET, welcher somit nicht schnell genug ein- und ausschaltete. Verursacht wurde dies den zu kleinen Gatestrom des PWM ICs. Somit wurde die Gatekapazität zu langsam umgepol. Dies war deutlich auf dem Kathodenstrahloszilloskop zu erkennen.

Daraus haben geschlossen wir, dass wir zwischen dem IC Ausgangssignal und dem MOSFET eine Treiberschaltung brauchten welche in kurzer Zeit mehr Strom liefern konnte und somit die Gate-Kapazität des MOSFETs schneller umgeladen werden um ein steileres Ein- und Ausschaltflanken zu erreichen.

Als wir die passende Treiberschaltung und die dazugehörige Beschaltung eruiert und in unsere Schaltung integriert hatten, fing das Austesten, zu beginn ohne Zeilentrafo, wieder von vorne an. Tatsächlich brachte die Treiberschaltung die gewünschte Besserung und der MOSFET schaltete mit einer steilen Flanke um. Jedoch brachten wir wiederum keinen grösseren Lichtbogen zustande.

Nach unzähligen Experimenten mit Pulsbreite und Frequenz, wie auch der Überprüfung der Schaltung vermuteten wir, dass das schnelle Ein- und Ausschalten des Zeilentrafos eine negative Auswirkung auf das Netzteil haben könnte, welches die Gleichspannung liefert. Die Vermutung lag nahe, dass der Gleichspannungsausgang nicht ideal für Impulsbelastung geeignet war. Dies bestätigte sich, da der Stromfluss sehr klein war.

Als wir das Netzteil öffneten und die Schaltung für die Glättung der Wechselspannung genauer untersuchten, stellen wir fest, dass diese nur aus einem Kondensator und einem Widerstand bestand. Durch unser schnelles ein- und ausschalten entstand ein hochfrequentes Signal das auf den Kondensator einwirkte. Dieser konnte nicht genug schnell Aufladen, da der Strom durch den Widerstand begrenzt war. Daher brach die Spannung am Ausgang sehr schnell zusammen, wodurch sich auch erklärte, warum wir nur sehr kurzzeitig eine Entladung erreichen hatten.

Wir entschieden selbst eine Gleichrichterschaltung zu entwerfen welche mit grossen Kapazitäten das hochfrequente Signal filtert und somit eine saubere Gleichspannung, welche auch genügend Strom liefern kann, zu entwerfen.

Nun folgten Berechnungen und Dimensionierungen der Gleichrichterschaltung. Dabei stützen wir unsere Berechnungen auf die maximale Stromentnahme des Netzteils. Zusätzlich berechneten wir die ungefähre Impulsbelastung des Netzteils. Die Dimensionierung der Kapazitäten ergänzten wir um einen zusätzlichen Reserverwert. Weitere Tests mit hohen Erwartungen standen bevor und endlich konnten wir nach diesen Rückschlägen einen Erfolg verbuchen. Wir brachten einen Lichtbogen von etwa 2-3 cm und eine Musikqualität entsprechend derer eines Handylautsprechers zustande.

Die Euphorie hielt nicht lange an, denn nach einigen Minuten Betrieb funktionierte nichts mehr, da der MOSFET zerstört war. Auch der zweite Transistor hielt nicht lange den Belastungen stand, trotz der Kühlung durch den CPU-Kühler eines PCs. Deshalb bauten wir gleich zwei parallel geschaltete, noch leistungsstärkere MOSFETs ein. Die Kühlung übernahm ebenfalls der aktive CPU-Kühler. Gemäss den Erwartungen verringerte sich die Temperatur der FETs, was nun einen längeren Betrieb ermöglichte.

Bei der Wärme- Überprüfung der restlichen Bauteile stellten wir fest, dass auch der Gleichrichter ein Kühlkörper benötigte. Durch die Kühlung wurde der Betrieb von mehreren Minuten sichergestellt.

Jetzt fing das Experimentieren erst richtig an. Wir testeten und untersuchten welche Auswirkungen die Primärwicklungszahl beim Zeilentrafo auf den Lichtbogen hat, ob die vertikale bzw. Horizontale Ausrichtung das bessere Ergebnis liefert und welchen Einfluss der Abstand der Funkenstrecke, die Speisespannung der Primärwicklung des Zeilentrafos, die Grundfrequenz und die Lage des Audiosignals auf dem Sägezahn hat.

Zum Schluss haben wir noch einen Festspannungsregler vor die ganze Steuerschaltung integriert, um die ganze Schaltung mit dem gleichen Netzteil versorgen zu können. Das Netzteil des Zeilentransformators arbeitet mit einer höheren Spannung als es die Steuerung benötigt. Damit konnte die Steuerelektronik konstant mit 12 Volt versorgt werden.

Für die jeweiligen Tests benutzten wir aber weiterhin 2 separate Netzteile. Eines für die Speisung der Steuerelektronik und das andere für die Primärwicklung des Zeilentrafos.

Die ganzen Tests führten wir als Versuchsaufbau durch und entschieden uns zum Schluss, nicht wie zu Beginn angenommen, gegen einen Bau eines Gehäuses. Es sprachen zu viele Störfaktoren bzw. notwendige Verbesserungen der Audioqualität und der Betriebsdauer dagegen.

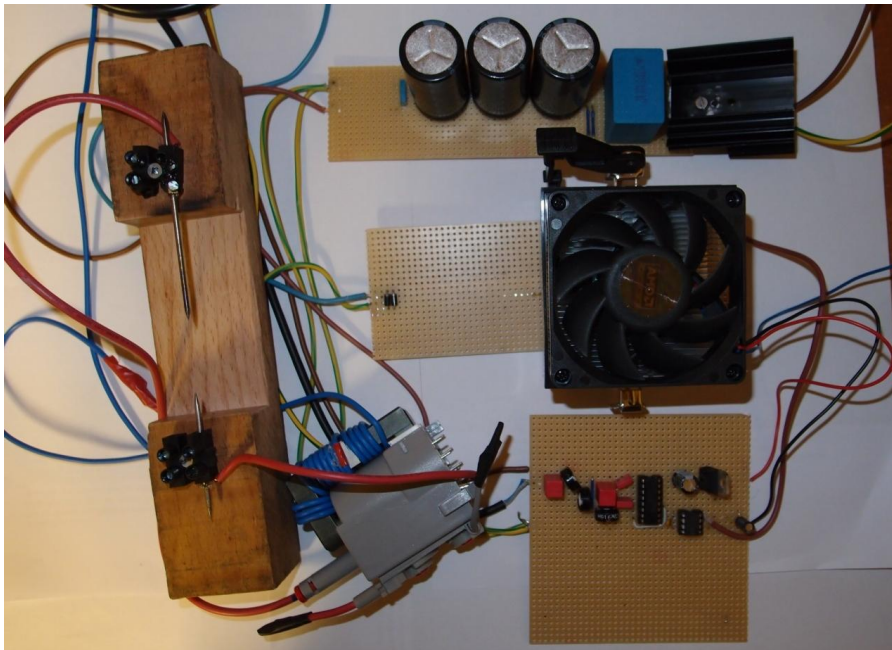


Abb. 5-1: Die ganze Schaltung inkl. Funkenstrecke

5.4 Probleme / Schwierigkeiten

5.4.1 Steuerelektronik

Nach dem ersten Versuchsaufbau der Steuerelektronik wurden bereits bei der Kontrolle einige Verdrahtungsfehler gefunden, welche zu beheben waren. So zum Beispiel der Eingang des Audiosignals, welcher kurzgeschlossen war. Als unsere Steuerelektronik dem Schaltungsentwurf entsprach, nahmen wir sie in Betrieb. Nach einigen Einstellungen funktionierte die Schaltung und wir hatten eine Pulsweitenmodulation unseres Audiosignals. Der Ausgangsstrom des PWM-IC's vermochte

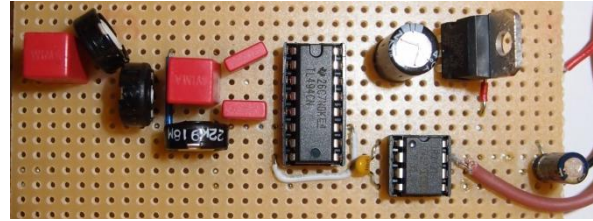


Abb. 5-2: Steuerelektronik-Teil der Schaltung

jedoch nicht die Gate-Kapazität in der hohen Frequenz von etwa 100kHz umzuladen. Also haben wir zusätzlich einen Treiber-IC eingebaut um die Gate-Kapazität möglichst schnell umzuladen.

5.4.2 Netzteil

Da das Netzteil für den Leistungsteil zuständig ist und dieser durch die hohe Frequenz stark impulsbelastet wird, ist es wichtig, dass es die nötige Leistung sofort zur Verfügung steht. Daher benutzen wir zum Stabilisieren der Spannung 3 Elektrolyt-Kondensatoren mit je 6800 mF , einen Folienkondensator von 10uF und einen zweiten Folienkondensator von

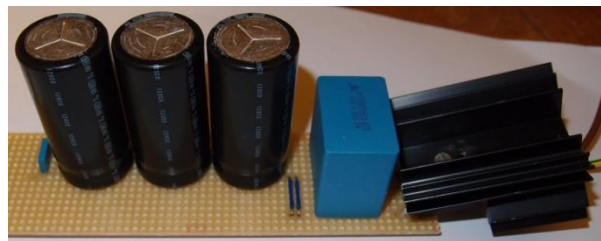


Abb. 5-3: Gleichrichter Elektronik

100nF. Mit zunehmender Kapazität machen sich Effekte der inneren Wicklung des Elektrolytkondensators bemerkbar. Diese verhalten sich wie Induktivitäten und verursachen eine schlechte Impulsleistung. Damit es in einem solchen Moment nicht an Leistung mangelt, steht dem Elektrolytkondensator für diese Zeit ein Folienkondensator bei. Der Folienkondensator ist nicht gewickelt und hat praktisch keine Induktivität. Der zweite kleine Folienkondensator soll hochfrequente Störsignale vom Netz gegen Masse ableiten. Störungen vom Netz sollen der Schaltung möglichst fern bleiben.

5.4.3 Kühlung

Der Gleichrichter für das Netzteil wie auch die beiden MOSFETs benötigen zur Wärmeabfuhr eine Kühlung. Der Gleichrichter wird mit einem Kühlblech passiv gekühlt. Um eine optimale Kühlung der MOSFETs zu gewährleisten wird ein aktiver Prozessorkühler benutzt. Problematisch war die Kühlung vor allem am Anfang, als wir den ersten kleineren MOSFET nur passiv gekühlt haben. Durch die grössere Oberfläche der aktuell



Abb. 5-4: Kühlung der zwei MOSFET

verbauten MOSFETs ist dieses Problem jedoch gut gelöst.

5.4.4 Elektroden

Zu Beginn haben wir für die Elektroden zwischen denen der Lichtbogen entsteht, normaler Kupferdraht benutzt. Dieser wies jedoch einen sehr hohen Verschleiss auf, sodass dieser durch Wolframelektroden ersetzt wurde. Wolframelektroden besitzen eine bessere Temperaturfestigkeit. Außerdem kann durch die kleine Oberfläche an der Spitze ein ideales Feld erzeugt werden. Das Feld ist so stark, dass der Lichtbogen oft gar nicht gezündet werden muss.



Abb. 5-5: Funkenstrecke der zwei Elektroden

5.4.5 Zeilentransformator

Beim Zeilentransformator kommt es auf die Primärwicklung an. Je kleiner die Wicklungszahl, desto höher die Ausgangsspannung beziehungsweise kleiner der Ausgangsstrom und umgekehrt. Die Spannung und der Strom erhöht bzw. reduziert sich mit dem Faktor der Windungszahl. Der Strom, welche die Primärseite liefert, nimmt mit der zunehmenden Windungszahl ebenfalls ab. Das wirkt sich positiv auf den Stromverbrauch sowie auf die Wärmeentwicklung der Bauteile aus. Das Windungsverhältnis muss dabei genügend gross sein, um die nötige Spannung für eine Plasmaflamme erzeugen zu können.

5.4.6 Lüftung und Ozon

Der Plasmahochtöner sollte in einem möglichst windstillen Raum betrieben werden, da Luftzug die Plasmaflamme beeinträchtigt. Also haben wir bei den Versuchen Fenster und Türen immer geschlossen gehalten. Da der Lichtbogen Ozon erzeugt, musste der Raum zu Beginn öfters gelüftet werden, um eine schädliche Ozonbelastung zu vermeiden. Durch eine optimale Einstellung des Lichtbogens konnte die Ozonerzeugung jedoch auf ein Minimum reduziert werden. Bei Betriebstemperatur ist die Ozonbelastung ausserdem weitaus geringer als direkt beim Einschalten der Anlage. Mit der Ozonproblematik haben jedoch auch andere Hersteller zu kämpfen. Ozon entsteht bei sehr starken Feldern, wie dem eines Blitzes. Normalerweise kommt Sauerstoff stets als O_2 Molekül vor. Ist das elektrische Feld jedoch genügend stark, verbinden sich $3O_2$ Moleküle zu $2O_3$ Molekülen. Das Gas ist instabil und zerfällt nach wenigen Stunden bis Tagen wieder. Ozon kommt vom Griechischen und bedeutet übersetzt „nach etwas riechen“. Der typische Ozongeruch „riecht“ nach Elektrizität. Bereits ab geringer Konzentration beginnt das Ozon in der Nasenschleimhaut zu oxidieren, was den typischen Geruch ergibt. In hoher Konzentration kann Ozon die Atemwege stark beschädigen. Daher gilt es als giftig und reizend. Professionelle Hersteller verwenden Katalysatoren, um das Ozon direkt nach dem Entstehen von der Umgebungsluft fernzuhalten.

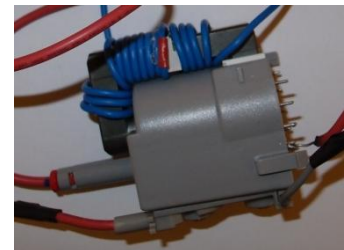


Abb. 5-6: Zeilentrafo mit Primärwicklung

5.5 Erkenntnisse zur Optimierung der Audioqualität

Die Audioqualität ist von mehreren Faktoren abhängig. Wichtige Faktoren sind die Pulsweitenmodulation (PWM), das Schalten der MOSFET's, Taktfrequenz, Eingangsspannung, Lichtbogendistanz und die Lichtbogenelektroden. Die Pulsweitenmodulation sollte so eingestellt sein dass der Tastgrad (Verhältnis der Impulsdauer zur Impulsperiodendauer) des Ausgangssignal, bei einem Eingangssignals eines Sinus, möglichst stark zwischen dem Wert 0 und 1 pendelt. Dadurch wird der Sinus am wahrheitsgetreuesten wiedergegeben. Um das PWM-Signal bestmöglich an die MOSFET's zu übertragen werden die Treiber benutzt.

Die Taktfrequenz, die Eingangsspannung und die Distanz der Elektroden für den Lichtbogen müssen aufeinander abgestimmt sein und werden am besten experimentell ermittelt. Diese Faktoren haben grossen Einfluss auf das Flackern des Lichtbogens und müssen so eingestellt sein dass Flackern und Grundrauschen auf ein Minimum reduziert werden. Die Elektroden zwischen denen der Lichtbogen gezündet wird, müssen angespitzt und axial zueinander ausgerichtet sein. Dies ist notwendig um einen definierten Ein- und Austrittspunkt für den Lichtbogen vorzugeben. Um dafür zu sorgen, dass die Elektroden durch den Abbrand möglichst spitz bleiben, ist das Material Wolfram aufgrund des hohen Schmelzpunktes besonders gut geeignet.

6 Vergleich

6.1 Vorgehen

Um den Audiovergleich herzustellen haben wir mithilfe des Laptops ein Musikstück über den Plasmatweeter abgespielt und bei einem elektrodynamischen Lautsprecher das Musikstück mit einem Frequenzweichen-Programm abgespielt. Dies ermöglichte uns das Musikstück bei beiden Systemen mit der selben Grenzfrequenz bzw. ohne die Tiefen zu vergleichen.

Des Weiteren untersuchten wir verschiedene Tonhöhen bzw. Frequenzen von 1kHz bis 20kHz und einen Sweep (Stufenloser Übergang von 1kHz bis 20kHz). Mithilfe von Aufnahmen die wir dann im Audacity-Programm darstellten verglichen wir die verschiedenen Sinusschwingungen der beiden Aufnahmen vom Plasmatweeter und dem elektrodynamischen Lautsprecher. Der Sweep des Tools ermöglicht es, die Amplitude bei definierten Frequenzen abzulesen. Damit kann eine Aussage gemacht werden, wie linear die Frequenzen abgebildet werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass das verwendete Mikrophon selbst nicht das ganze Frequenzspektrum linear erfassen kann. Aus diesem Grund haben wir beim Versuch jeweils eine Frequenzkurve des Mikrophones dem Bild hinzugefügt.

6.2 Resultate

6.2.1 Auswertung Pulsweitenmodulation

In der „Abbildung 6-1: Messung Audiosignal“ sind folgende Kurven ersichtlich:

- Eingangssignal der Audioquelle (Kanal 2, Türkisblaue Kurve)
- Pulsweitenmoduliertes Signal (Kanal 1, Gelbe Kurve)
- Schnelle Fourier Transformation kurz FFT (Kanal m, Violette Kurve; die Amplitude wird in Funktion der Frequenz angezeigt.)

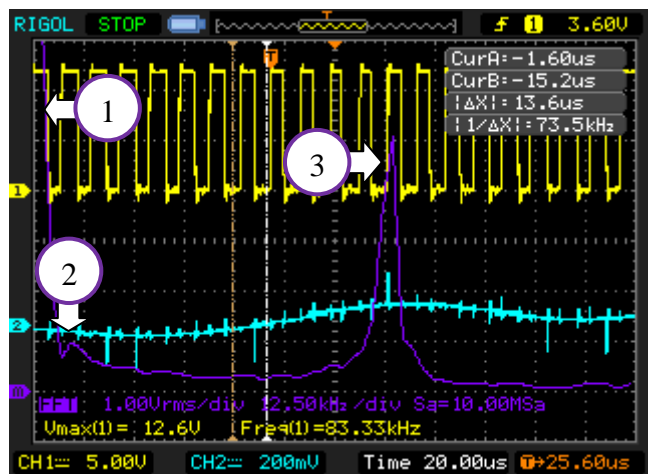


Abb. 6-1: Messung Audiosignal

Wie im Eingangssignal ersichtlich ist, wird bei jedem Schaltvorgang des PWM-Signals eine Spannung in das Audiosignal induziert. Dies hat aber keine Auswirkungen auf die Tonqualität, da diese Spitze erst nach dem Schalten entsteht und spätestens zum nächsten Schaltvorgang verschwunden ist.

Die Violette Kurve stellt die RMS-Spannung des PWM in Funktion der Frequenz dar. Zu Beginn bei der Markierung 1 ist zu sehen dass die Spannung bei wenigen 100 Hz hoch ist. Dies ist auf die 12.6V Maximalspannung des PWM zurückzuführen. Bei der Markierung 2 sieht man den Anteil der Frequenz des Liedes. Die Markierung 3 zeigt die Grundfrequenz des PWM, welcher bei diesem Test 83.33 kHz betrug.

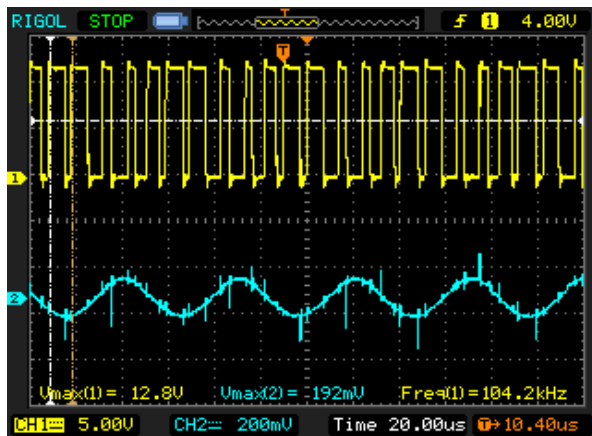


Abb. 6-2: PWM bei 20kHz Sinus

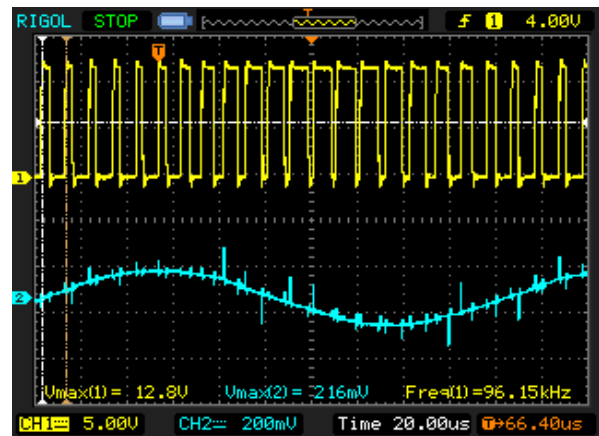


Abb. 6-3: PWM bei 5kHz Sinus

In der Abbildung 6-2: PWM bei 20kHz Sinus sieht man wie das blaue Audiosignal im Kanal 2 als gelbes pulswidenmodulierte Signal im Kanal 1 widergegeben wird. Die Spitzenspannung des Audiosignals beträgt 192mV und eine Frequenz von 20kHz. Das PWM-Signal hat eine Grundfrequenz von 104.2kHz. Man sieht, wie sich die Pulsbreite je nach Spannung des Audiosignals anpasst.

In der Abbildung 6-3 sieht man noch deutlicher, wie sich der Tastgrad anhand der Signalspannung anpasst.

6.2.2 Auswertung Akustisch

Nach der Überprüfung des Signalganges am KO, galt es nun eine akustische Auswertung des Signals zu machen. Dazu wird beiden Lautsprechern ein Sweep (eine logarithmische Zunahme einer Sinuskurve in der Frequenz) zur Wiedergabe gesendet. Mit dem Messmikrofon sollte der nachgebildete lineare Sweep dann erneut in das Frequenzspektrum gebracht werden. So kann die Linearität des Systems beurteilt werden. Problem bereitete dabei das teilweise starke elektromagnetische Feld des Lichtbogens. Dies erzeugte beim Messmikrofon starke Störgeräusche, welche die Aufnahme verzerrten. Nach dem Testen mit weiteren Mikrofonen wurde der Entschluss gefasst, mit einem besser abgeschirmten Mikrofon die Überprüfung zu machen. Interessanterweise eignete sich das interne Mikrofon des MacBooks sehr gut, da es sich hinter dem dort gelochten Aluminiumgehäuse befindet. Die Vermutung liegt nahe, dass das Gehäuse einen Grossteil der elektromagnetischen Wellen aufnimmt und daher diese nicht mehr direkt zum Mikrofon gelangen. Die Herausforderung war jedoch gross ein Aussagekräftiges Schema zu erhalten. Das interne Mikrofon ist auf Sprache ausgelegt und nimmt daher Frequenzen oberhalb von 5kHz relativ schlecht wahr. Um dennoch ein aussagekräftiges Schema zu erhalten, haben wir den Frequenzgang des Mikrophones miteinbezogen. Da von offizieller Seite kein detailliertes Schema des Mikrophones zur Verfügung stand, musste der Frequenzgang möglichst genau ermittelt werden. Dazu haben wir das Mikrofon an einer Referenzanlage ausgemessen. Die Anlage besteht aus Monitorlautsprechern welche einen sehr genauen, linearen Frequenzgang haben. Mittels linearen Rauschens kann nun der Frequenzgang des Mikrophones ermittelt werden, In einem nächsten Schritt haben wir den Amplitudengang des Plasmatweeters ausgemessen.

6.2.3 Frequenzgang der Lautsprecher

In diesem Kapitel werden die Frequenzgänge der Lautsprecher verglichen

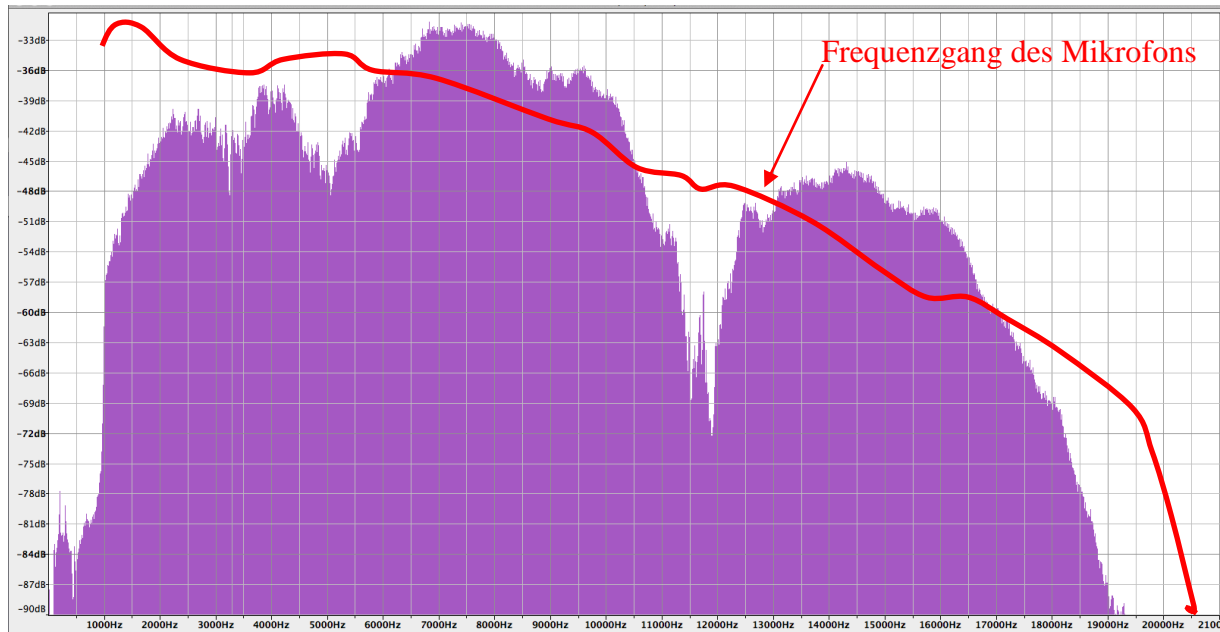


Abb. 6-4: Frequenzgang Plasmatweeter

Interessant an der Kurve ist vor allem das Einknicken der Kurve bei 11-12KHz. Das schwächere Signal kommt wahrscheinlich dadurch zustande, dass der Tweeter bei dieser Frequenz am meisten Strom benötigt, um einen gleichlauten Ton erzeugen zu können. Dies haben wir beim Messen auch so festgestellt. Unsere subjektive Wahrnehmung beim Test konnte das Problem jedoch nicht in gleichem Ausmass feststellen. Daher vermuten wir, dass es sich ausserdem um einen Messfehler durch das immer noch sehr starke elektrische Feld handeln könnte. Festgestellt wurde, dass das elektrische Feld als beim Betrieb die Touchpads unserer Notebooks nicht mehr bedienen konnten. Das Touchpad des MacBook's arbeitet nach dem kapazitiven Erkennungsprinzip. Die Störung durch den Lichtbogen war so gross, dass der Finger nicht mehr erkannt wurde. Zusätzlich wichtig ist die Erkenntnis, dass obwohl das Mikrofon zusätzlich an Lautstärke verliert, ein Teil der hohen Frequenzen trotzdem relativ hoch bleibt. Daher könnte man davon sprechen, dass der Plasmalautsprecher einige Frequenzen „verstärkt“. Nichtsdestotrotz bleibt zu sagen, dass der Lautsprecher weit von der Linearität entfernt ist! Die Knicke und Einbrüche in der Kurve sind definitiv zu stark.

In den nachfolgenden Diagrammen sieht man den Frequenzgang des klassischen elektrodynamischen Lautsprechers und des Plasmatweeters.

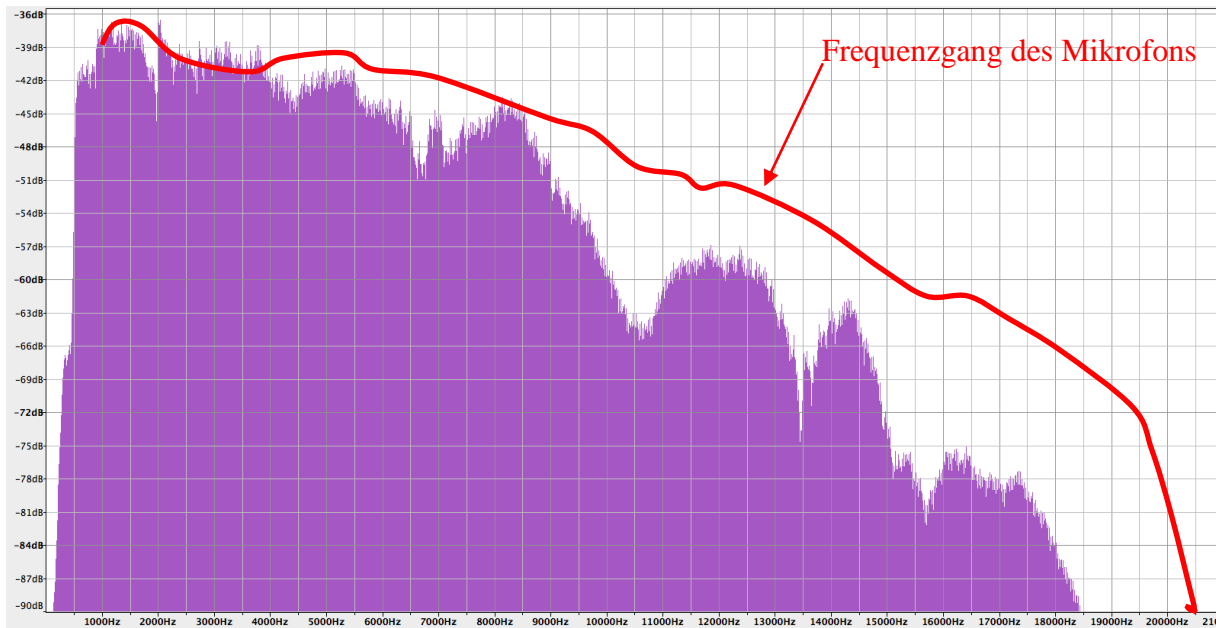


Abb. 6-5: Frequenzgang Elektrodynamischer Lautsprecher

Der im Versuch verwendete Hochtöner stammt aus einer PC Soundanlage. Die Soundanlagen für Computer haben die positive Eigenschaft, dass sie relativ gezielt auf eine Person oder auf ein Mikrofon ausgerichtet werden können.

Beim Vergleichen der beiden Kurven unter Berücksichtigung der Mikrofonempfindlichkeit sieht man deutlich, dass der Plasmalautsprecher im Bereich um 5-10kHz relativ linear verläuft. Der elektrodynamische Lautsprecher verläuft zuerst relativ gerade, verliert jedoch bei höheren Frequenzen relativ rasant an Lautstärke. Deutlicher wird dies noch, wenn man ein Teilstück eines Songs betrachtet. Der Song Knocking on Heavens Door von Guns N' Roses ist aufgrund des grossen Anteils an Höhen gut für einen Vergleich geeignet. Wir haben dem Lied die tiefen Frequenzen unterhalb von 1,5 kHz abgeschnitten. Im Anschluss wurde das Lied wieder erneut auf beiden Lautsprechern abgespielt. Das aufgenommene Stück wurde dann erneut im Frequenzgang analysiert.

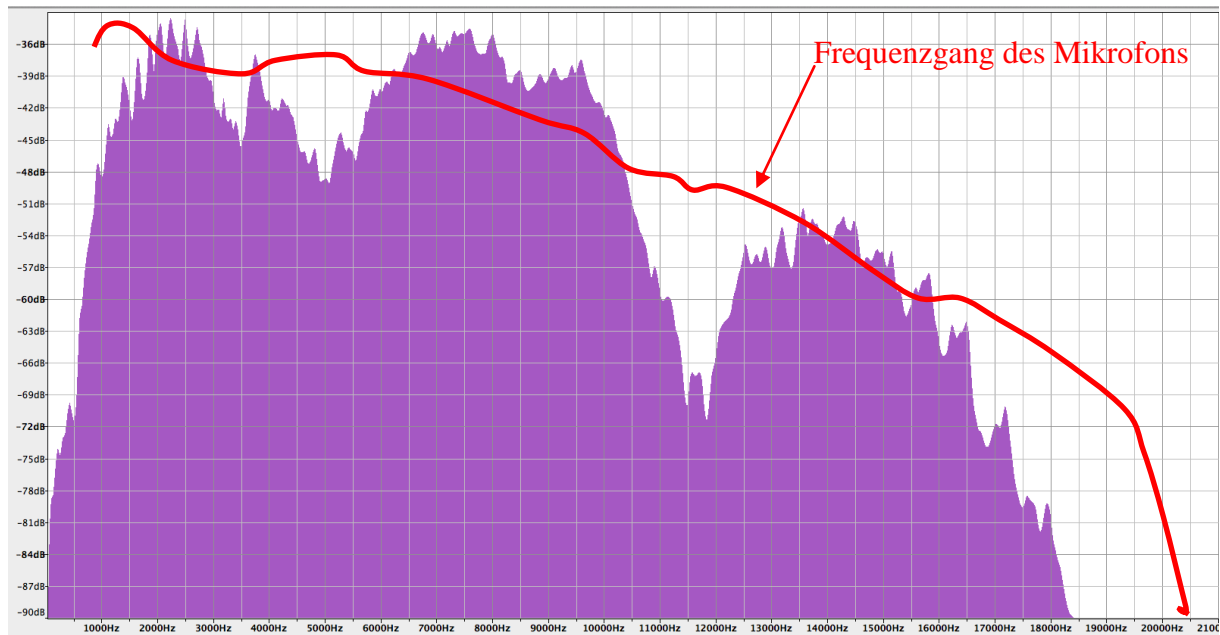


Abb. 6-5: „Knocking on Heavens Door“ Frequenzgang Plasmatweeter

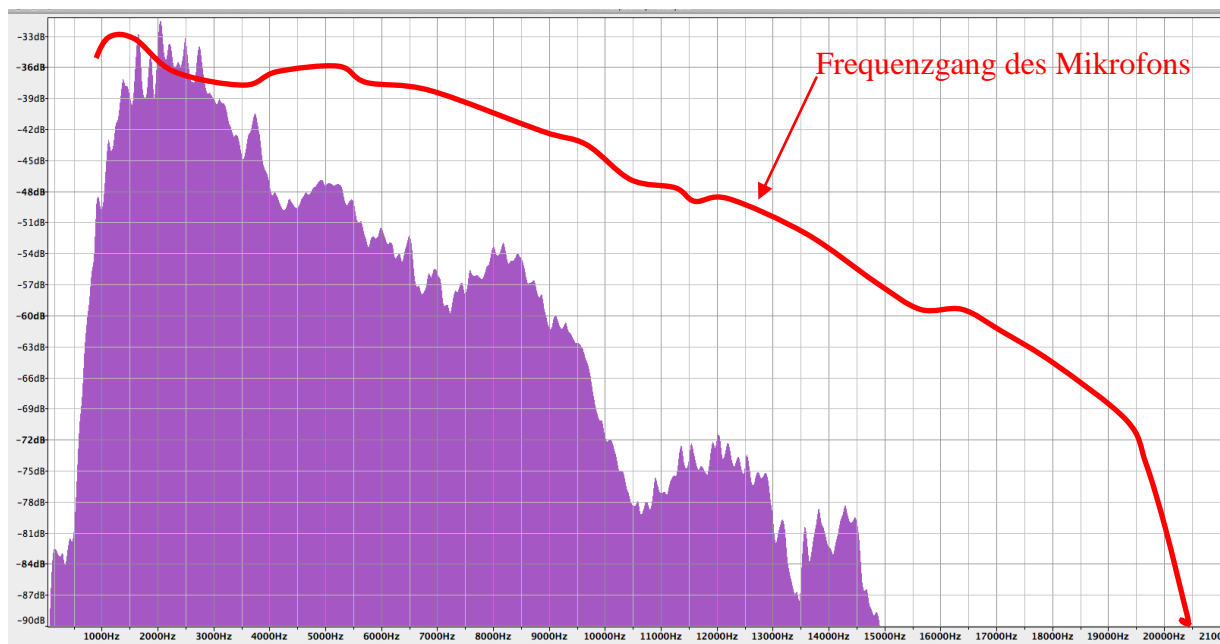


Abb. 6-6: „Knocking on Heavens Door“ Frequenzgang elektrodynamischer Lautsprecher

Das Resultat überraschte uns in diesem Fall stark. Während der PC Lautsprecher bei Frequenzen überhalb von 15kHz bereits keine Töne mehr erzeugen kann, reicht das Spektrum des Plasmalautsprechers noch bis fast 18kHz. Dies bedeutet, dass der Plasmalautsprecher im direkten Audiotest die natürlichere Wiedergabe des Stückes erreichte. Insgesamt könnte daher zumindest von einem Teilerfolg sprechen. Dies beweist auch, dass das System durchaus Potential hat.

6.3 Diskussion

Wie unsere Messungen aufgezeigt haben, wurde unsere Hypothese bestätigt. Ein Plasmahochtöner ist im Vergleich zu einem herkömmlichen elektrodynamischen Hochtöner im Vorteil, da dieser keine träge Masse in Schwingung versetzen muss. Dies hat unsere Arbeit bestätigen können. So schätzen wir zumindest, dass unser Lautsprecher noch höhere, nicht messbare Frequenzen darstellen könnte. Durch unsere Arbeit hat sich ein neues Problem ergeben. Die elektromagnetische Strahlung, welche auf das Mikrofon und die Messleitungen wirken, verfälschen das Messsignal. Ein exaktes und störungsfreies Messen des Schalls war mit den vorhandenen Hilfsmitteln schwierig. Die rein subjektive Wahrnehmung bemerkt jedoch sofort, dass der Lautsprecher sicherlich nicht mit den High-End Hochtönern mithalten kann. Der Frequenzgang ist alles andere als linear, selbst im Hochtonbereich sind starke Schwankungen gemessen worden. Die Vermutung von hochfrequenten Störfaktoren durch die hohe Schaltgeschwindigkeit der Transistoren liegt nahe. Ein weiteres Problem ist die Ozonerzeugung, welche nicht vermeidbar ist. Kritisch ist ausserdem der Wirkungsgrad des Prinzips. Ein Grossteil der Energie geht stets durch den Lichtbogen selbst verloren. Der Schall entsteht quasi nur als Nebenprodukt. Durch den hohen Stromverbrauch und den Verschleiss der Elektroden ist das System nicht mehr zeitgemäss. Geschätzte alle 100 - 1000 Betriebsstunden müssten die Elektroden gewechselt werden. Die Wartung des Produktes ist also sehr aufwändig. Bereist bei unseren Versuchen haben wir festgestellt, dass die Elektrodenspitzen nach den wenigen Stunden erste Verschleisszeichen vorwiesen. Das Prinzip des direkten Lichtbogens erzeugt ausserdem grosse Wärme die abgeführt werden muss. Beim günstigeren vertikalen Aufbau erwärmen sich die oberen Klemmen deshalb sehr stark. Bei einem Endprodukt müssten diese einer genug grossen Temperatur standhalten können. Anlass zur Kritik ergibt auch die mangelnde Lautstärke. Das Prinzip ist auf physikalische Gegebenheiten beschränkt und kann nur durch hohen Mehraufwand verstärkt werden. Dabei müsste der Lichtbogen um einiges grösser sein, was wiederum auf die Dimensionierung der Bauteile einen Einfluss hätte. Um dennoch eine Besserung erreichen zu können bedarf es einem passenden Gehäuse. Diesessollte die Form eines Hornes haben, um die nach hinten abgestrahlte Musik nach vorne zu führen.

Schon für den Versuchsaufbau waren die reinen Materialkosten relativ hoch. Der Preis für die nötigen Bauteile betrug rund 160.-. Der Aufbau ist im Vergleich zum normalen Hochtöner aufwändig und mit hohen Entwicklungs- und Materialkosten behaftet.

Weitere Entwicklungsschritte wären ausserdem bei den Transformatoren angebracht. Der Zeilentransformator ist zu stark auf das ursprünglich gedachte Gerät abgestimmt. Die Trägerfrequenz des Pulsweitensignals mussten wir in der Arbeit mehrere Male exakt abstimmen, um mit dem Transformator korrespondieren zu können. Ein perfekt abgestimmter Transformator wäre für den kommerziellen Einsatz nützlich.

Auf dem Markt sind wenige, jedoch zum Teil qualitativ hochstehende und demnach teure Systeme vorhanden. Es gibt wenige Einzelanfertigungen welche zum Beispiel auf Onlinebörsen zu hohen Preisen gehandelt werden. Die meisten dieser Produkte funktionieren nicht nach dem PWM-Prinzip des Plasmahochtöners, sondern nach dem des Ionenhochtöners. Der Verschleiss kann bei diesem Prinzip begrenzt werden, da kein direkter Überschlag entsteht. Die Röhren der Geräte sind aber im Falle eines Defekts schwerer zu erlangen.

Zum Schluss dieses Diskussionsteiles muss daher festgehalten werden, dass das Prinzip auch auf dem professionellen Markt in ähnlicher Weise existiert. Der entwickelte Aufbau besitzt gewiss noch Mängel, die in einer finalen Version ausgebessert werden müssten. Wichtig ist dennoch die Erkenntnis, dass wir nicht in eine komplett falsche Entwicklungsrichtung gearbeitet haben.

7 Schlusswort

Die Arbeit und die Entwicklung der Schaltung war interessant und aufschlussreich. Es war insgesamt eine positive Erfahrung, ein solches Projekt von Anfang bis zum Schluss zu realisieren.

Unsere Annahme, dass der Plasmatweeter im Hochtongebiet bessere Qualität liefert als ein herkömmlicher Lautsprecher, konnten wir zum Teil bestätigen.

Trotz diverser Schwierigkeiten haben wir unser Ziel, einen funktionierenden Plasmatweeter zu realisieren, erreicht.

Um den Plasmatweeter über längere Zeit und mit unterschiedlichen Musikquellen zu betreiben wären noch diverse Verbesserungen nötig gewesen. Dies hätte jedoch unseren Zeitrahmen gesprengt.

8 Quellenverzeichnis

8.1 Text

- Plasmatweeter.de
<http://www.plasmatweeter.de/iml.htm>
<http://www.plasmatweeter.de/ozon.htm>
- Wikipedia: Pulsweitenmodulatin
<http://de.wikipedia.org/wiki/Pulsweitenmodulation>
- **Datenblätter**
TL494: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf>
IR2121: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2121.pdf>
LM7812c: <http://freedatasheets.com/downloads/LM7812.pdf>
IRFP048n: http://www.mikrocontroller.net/attachment/97748/78XX_05_12_15.pdf

8.2 Bilder

- Abb. 4-1: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/Oszi_Ton.svg
- Abb. 4-2: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c5/Oszi_Klang.svg
- Abb. 4-3: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fa/Oszi_Geräusch.svg
- Abb. 4-4: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Oszi_Knall.svg
- Abb. 4-5: http://www.aredvd.de/images/pioneer_ex_woofer_cut.jpg
- Abb. 4-6: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/af/Pwm.png>
- Abb. 9-1: <http://www.hackerbotlabs.com/wp-content/uploads/2009/02/arc-speaker.png>

9 Anhang

9.1 Schema

9.1.1 Version 1

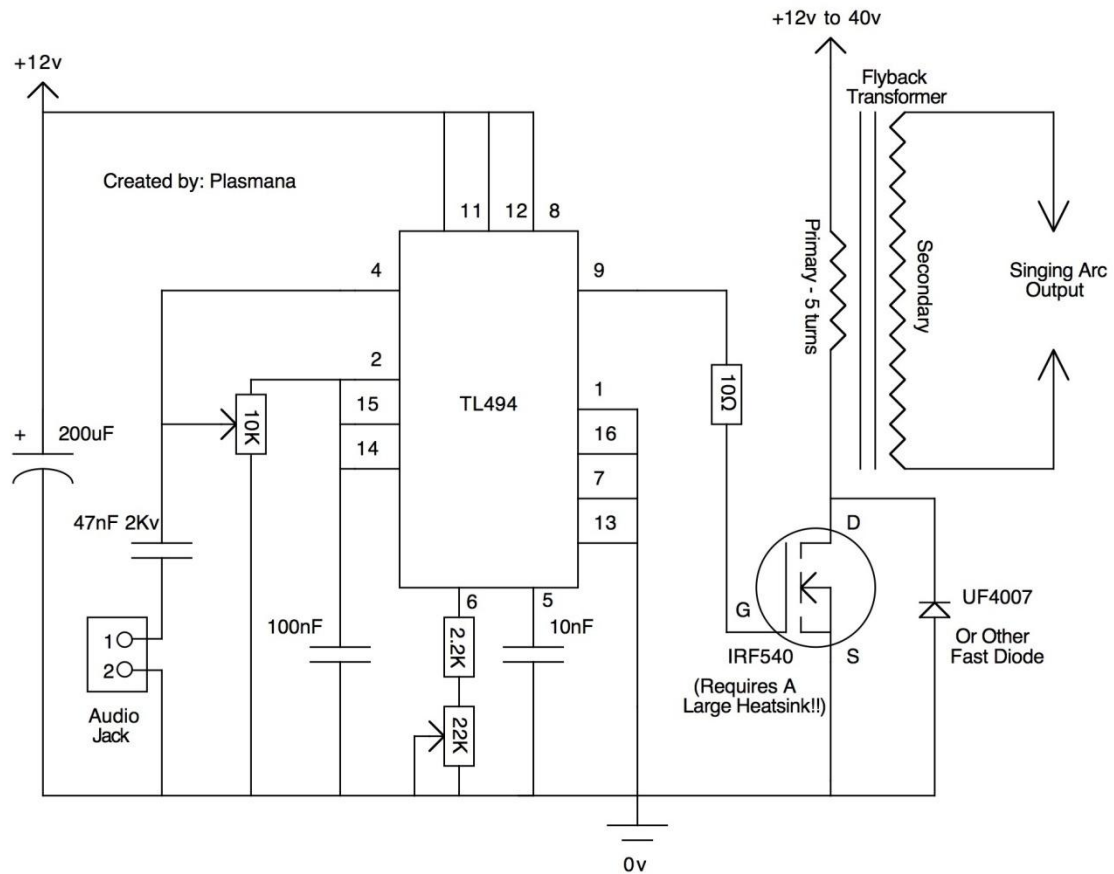


Abb. 9-1: Schema Version 1

9.1.2 Version 2

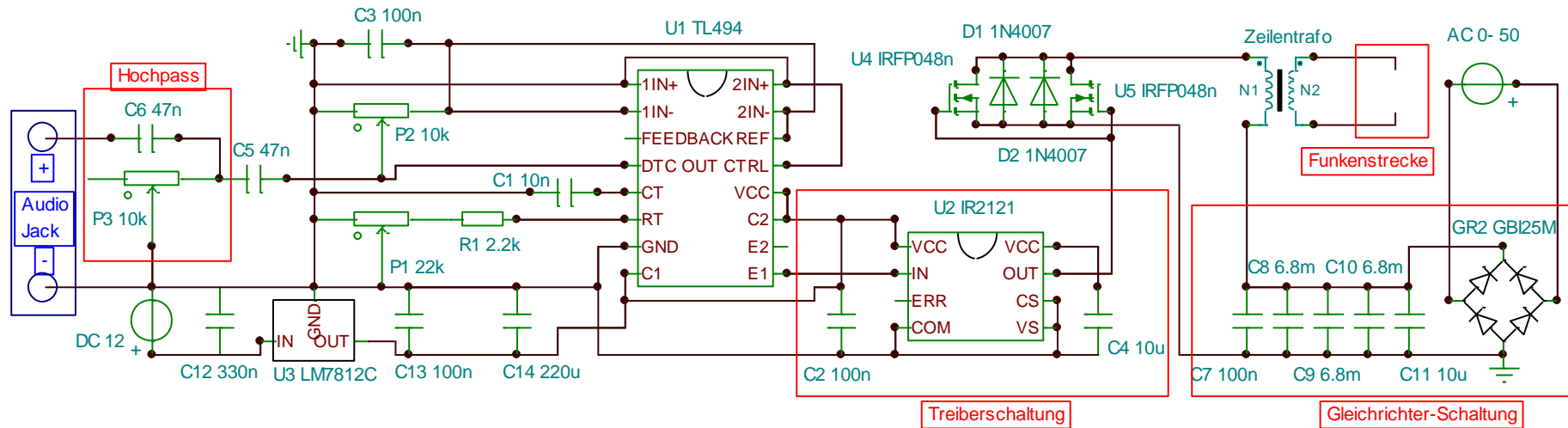


Abb. 9-2: Schema Version 2

Idealeinstellungen

PWM Grundfrequenz (mit P1 einzustellen):

Lage des Musiksignals auf dem Sägezahnsignal (mit P2 einzustellen):

Hochpass (mit P3 einzustellen):

104kHz

Hängt von der Leistung der Musikquelle ab und muss individuell auf das jeweilige Gerät angepasst werden (wird über die Pulsbreite des ursprünglichen PWM-Signals angepasst)

Ca. $1.7\text{k}\Omega$ ergibt eine Grenzfrequenz von 2kHz

9.2 Materialliste

Anzahl	Beschreibung	Preis pro Stück	Preis Gesamt
3	Alu-Elko radial 6.6mF 50VDC	Fr. 4.00	Fr. 12.00
1	Folienkondensator 10nF 100VDC, 63VAC, 5mm	Fr. 0.75	Fr. 1.50
2	Folienkondensator 47nF 100VDC, 63VAC, 5mm	Fr. 1.10	Fr. 2.20
2	Folienkondensator 100nF 100VDC, 63VAC, 5mm	Fr. 0.80	Fr. 21.60
2	Keramikkondensator 100nF 50 VDC	Fr. 0.12	Fr. 0.24
1	Keramikkondensator 330nF, 50V	Fr. 0.70	Fr. 0.70
1	Folienkondensator 10uF 300VDC, 160VAC, 27. 5mm	Fr. 6.90	Fr. 6.90
1	Folienkondensator 10uF 50V, 2. 5mm	Fr. 0.15	Fr. 0.15
1	Alu-Elko radial 220uF, 25VDC	Fr. 0.95	Fr. 0.95
1	Kohleschicht-Widerstand 2.2k Ω	Fr. 0.24	Fr. 0.24
2	Trimmer Kohle 10k Ω , linear 0.15W	Fr. 1.30	Fr. 2.60
1	Trimmer Kohle 22k Ω , linear 0.15W	Fr. 0.80	Fr. 0.80
2	Diode 1N4007 1000V/1A	Fr. 0.20	Fr. 0.40
1	Bruckengleichrichter 700V 25A	Fr. 2.70	Fr. 2.70
2	LeistungsmOSFET IRFP048n	Fr. 6.00	Fr. 12.00
1	Linear IC TL 494	Fr. 2.80	Fr. 2.80
1	Kontroll IC IR2121	Fr. 5.95	Fr. 5.95
1	Festspannungsregler 7812CV	Fr. 0.95	Fr. 0.95
1	Zeilentrafo	Fr. 50.00	Fr. 50.00
3	Laborkarte FR2 Phenolhartpatier	Fr. 4.20	Fr. 12.60
1	Standard IC Fassung 8 Pole	Fr. 0.25	Fr. 0.25
1	Standard IC Fassung 16 Pole	Fr. 0.30	Fr. 0.30
1	Klinkenstecker 3.5mm 3P	Fr. 3.80	Fr. 3.80
0.5m	Audiokabel 1 core 0.22mm ² x2	Fr. 4.70	Fr. 4.70
1	Profil-Kühlkörper 4 K/W	Fr. 4.75	Fr. 4.75
2	Wolframelektroden	Fr. 5.00	Fr. 10.00

Total	Fr. 109.41	Fr. 161.08
--------------	-------------------	-------------------

9.3 Exposé

Projektarbeit : Exposé

Name

Cyrill	Knüsel
Pascal	Jund
Mario	Fischer

Thema: **Plasmatweeter / Ein Hochtonsystem im Vergleich**

Gegenstand der Arbeit (Was wird untersucht/beschrieben?)

Wir bauen einen Plasmalautsprecher und vergleichen diesen akustisch mit einem herkömmlichen elektrodynamischen Lautsprecher.

Arbeitsmaterialien

- Elektrische und elektronische Bauteile für den Lautsprecher
- Mechanische Bauteile für die Schutzeinrichtung
- Messinstrumente (Multimeter, Oszilloskop, Mikrofon)
- Elektrodynamischer Lautsprecher

9.3.1

Arbeitsvorgehen / Arbeitsschritte

- Schaltplan entwerfen / definieren
- Material beschaffen
- Plasmalautsprecher zusammenbauen
- Inbetriebnahme des Plasmalautsprechers
- Akustischer Vergleich des Plasmalautsprechers mit einem elektrodynamischen Lautsprecher
- Auswertung des Vergleiches

Inhaltsverzeichnis

- Vorwort
- Abstract
- Einleitung
- Dokumentation des Aufbaus
- Inbetriebnahme des Plasmalautsprechers
- Vergleich Plasmalautsprecher mit einem elektrodynamischen Lautsprecher
- Auswertung
- Schlusswort
- Glossar
- Quellenangabe
- Anhang

Bemerkungen

- Kostenschätzung: Maximales Budget 300.00 CHF inkl. Druck der Arbeit.

9.4 Eidesstattliche Erklärung

Wir erklären hiermit, dass wir die vorliegende interdisziplinäre Projektarbeit eigenständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe erstellt haben und dass alle Quellen, Hilfsmittel und Internetseiten wahrheitsgetreu verwendet wurden und belegt sind.

Luzern den 07.03.2013

Cyrill Knüsel

Mario Fischer

Pascal Jund