

Diskussion der Theremin Bauanleitung „S. Zorin: Termenvox - Modelist Konstruktor Nr. 4 1981, S. 23-25“

© A. Klaus aetherwellen-musik.de Version 0.8 info.aetherwellen-musik@t-online.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Eigenschaften des Theremin-Instruments	3
3	Schaltplan	4
4	Aufbau und Funktion	5
4.1	Steuerung der Tonhöhe.....	5
4.1.1	Tonhöhe-Oszillatoren.....	5
4.1.2	Gekoppelte Schwingkreise, Ziehen.....	5
4.2	Spulen.....	6
4.2.1	Antennen-Verlängerungsspulen.....	6
4.2.1.1	Tonhöhe-Oszillatorfrequenz 180kHz.....	7
4.2.1.2	Lautstärke-Oszillatorfrequenz 260kHz.....	7
4.2.1.3	Liegt die Lautstärke-Oszillatorfrequenz nicht doch bei 470kHz ?.....	7
4.2.2	Lautstärkedetektor-Koppelspule.....	7
4.2.3	Lautstärke-Oszillatorspulen.....	8
4.2.4	Werte für Lautstärke-Oszillator-Spulen, Schwingkreiskondensator und Antennenspule.....	9
4.2.5	Tonhöhe-Oszillatorspulen.....	9
4.2.6	Werte für Tonhöhe-Oszillator-Spulen, Schwingkreiskondensatoren und Antennenspule.....	9
4.2.7	Ferritstäbe.....	10
4.3	Transformatoren.....	10
4.4	Röhren.....	10
4.5	Mischstufe.....	11
4.5.1	Audio-Spektrum und Kopplungs-Kompensation.....	11
4.6	Antennenspulen-Abgleich.....	11
4.7	Steuerung der Lautstärke.....	12
4.8	Klangfarben-Beeinflussung.....	13
4.9	Endstufe.....	13
4.10	Abgleich.....	13
4.11	Stumm-Schalter.....	13
4.12	Netzteil, Endstörmaßnahmen und Erdung.....	13
4.13	Ständer.....	14
4.14	Lautsprecher und Schallwand.....	14
5	Mechanischer Aufbau	14
5.1	Gehäuse und Ständer.....	15
5.2	Chassis.....	16
6	Änderungen	20

1 Einleitung

In der russischen Modellbauzeitschrift „**Modelist Konstruktor**“ wurde in Ausgabe Nr. 4 aus dem Jahre 1981 (Seite 23 bis 25) vom Autor **S. Zorin** eine Theremin-Bauanleitung „**Termenvox**“ vorgestellt (*„ТЕРМЕНВОКС“*; С. Цорин, *МОДЕЛИСТ КОНСТРУКТОР 1981 № 4*). In der selben Ausgabe (Seite 21 bis 22) ist ein weiterer Artikel des Autors mit der Lebensgeschichte L. Termens, die eng mit der Entwicklung seines Termenvox-Instruments verbunden ist enthalten, der offenbar auf einem Interview mit Lev Termen (Leon Theremin; L.T.) beruht: „Seiten der Geschichte: Klang - körperlos“ (*страницы истории: 'свободно из простран - ства Вышедший звук‘*; С. Цорин, *МОДЕЛИСТ КОНСТРУКТОР 1981 № 4*).

Um hier die dort vorgeschlagene Schaltung und den Aufbau diskutieren zu können, musste der russische Originalartikel zuerst übersetzt werden. Dabei stellten sich im Text Fehler heraus, die korrigiert wurden. Leider waren im Originalschaltbild ebenfalls zahlreiche Fehler vorhanden, die eine korrekte Funktion der dort dargestellten Schaltung unmöglich machten. Die Angaben zu den Spulen sind teilweise ebenfalls zweifelhaft. Aus diesen Gründen ist nun ein neuer Schaltplan erstellt worden, der die vorgeschlagenen Korrekturen, Ergänzungen und Bauteilwerte enthält. Es sind z.B. die Endkopplungskondensatoren des Heizkreises sowie die Ausgangsspannung des Trafos zur negativen Hilfsspannungserzeugung hinzugefügt worden. Die Schaltung, insbesondere die Besonderheiten der Oszillatoren, die Verwendung von Verlängerungsspulen sowie der verwendete Mischer und auch die sprachliche Formulierung, die sich wie die Niederschrift eines Interviews anhört, deuten auf die Mitarbeit von L.T. hin, der offenbar durch den Autor S. Zorin befragt wurde. Das von L.T. in den 1990er Jahren bei seiner letzten Reise in die USA vorgeführte Instrument (welches er schon seit den 1950er Jahren verwendet hat, wie aus Filmdokumenten ersichtlich ist) war offenbar Grundlage dieser Bauanleitung. Es handelt sich hier möglicherweise um den durch Termen selbst angefertigten verbesserten Prototyp. Die Anordnung der Bauelemente und die Spulen der „Bauanleitung“ stimmen jedoch nicht mit dem bekannten Foto des Inneren Aufbaus dieses Instruments überein. Die Oszillatorschaltungen dürften dort eine erheblich höhere Windungszahl und Induktivität aufweisen.

Der russische Artikel ist weniger eine detaillierte Bauanleitung als eine Beschreibung der grundsätzlichen Funktions- und Konstruktionsweise, wie sie offenbar von L.T. selbst angegeben und anhand des vorhandenen Prototyps dokumentiert wurde. Somit würde sie die bisher einzig bekannte nach L.T. Aussagen dokumentierte Beschreibung darstellen.

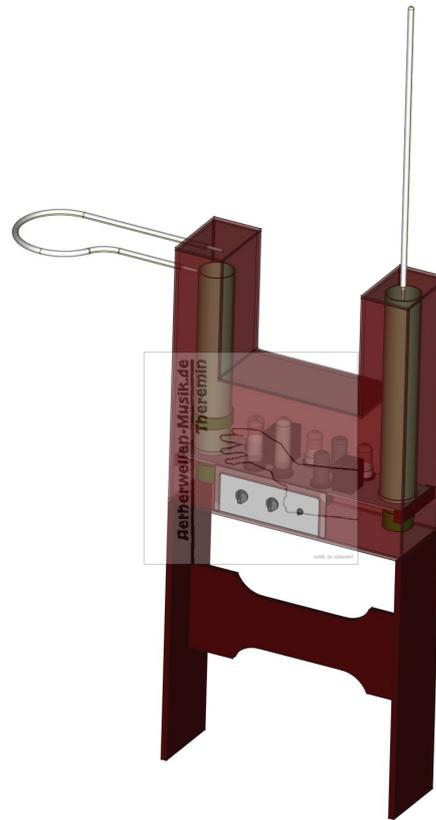


Abbildung 1: *Modelist Konstruktor*
1981-4 Theremin

Es existieren hier noch die Aufzeichnungen von L. Rosen, die aus Befragungen von L.T. entstanden sind, sowie ein jedoch unvollständiger Schaltplan. Hier wird das stark verbesserte Theremin-Instrument beschrieben, wie es L.T. für L. Rosen und C. Rockmore in den 1930er Jahren in den USA gebaut hat. Zu erwähnen ist auch der von R. Moog in den 1970er Jahren bei den Restaurierungsarbeiten des Rockmore-Theremins erstellte Schaltplan. Dieser Plan ist ebenfalls unvollständig, da das links am Gerät befindliche Einstellrad sowie der 440Hz Tonhöhenindikator nicht dokumentiert wurden.

Die hier diskutierte (korrigierte) Schaltung konnte bisher noch nicht als Versuchsaufbau realisiert werden um die korrekte Funktion sowie Bauteilwerte zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen (Stand 07.2023).

2 Eigenschaften des Theremin-Instruments

In der Bauanleitung enthaltene Bilder zeigen L.S. Termen wie er auf dem von ihm geschaffenen elektronischen Musikinstrument spielt, sowie die im Laufe der Jahre entstandenen Termenvox-Varianten:

- 1 - Prototyp von L.S. Termen (1920er Jahre)
- 2 - Instrument der 1930er Jahre (RCA)
- 3 - Aktuelle modifizierte Version (1950er Jahre)

Das in der Bauanleitung beschriebene Theremin-Instrument soll für die Tonlagen Sopran, Alt, Tenor und Bass über 4,5 Oktaven konfiguriert werden können. Die Tonhöhe wird durch die horizontale Bewegung der rechten Hand in Richtung der vertikalen Stabantenne gesteuert, die vertikale Bewegung der Hand entlang des Antennenstabes soll dabei keine Auswirkung auf die Tonhöhe haben.

Mit der linken Hand wird die Lautstärke des Tons wie allgemein üblich geregelt, indem die Handfläche über der zweiten Antenne, die aus einer horizontalen Metallschleife besteht, auf und ab bewegt wird.

Der Abstand der beiden Antennen soll der Armlänge entsprechen (70 – 90cm). Durch die Bewegung der Hände in der Horizontalen (*Tonhöhe*) und der Vertikalen (*Lautstärke*) Ebene, soll die kapazitive Beeinflussung der Handpositionen untereinander reduziert werden.

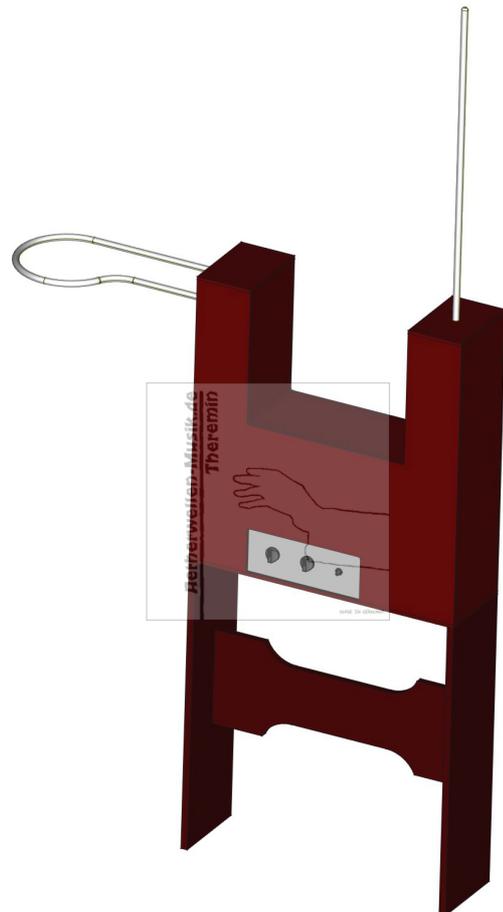


Abbildung 2: Aktuelle modifizierte Version (3) nach Modelist-Konstruktor

3 Schaltplan

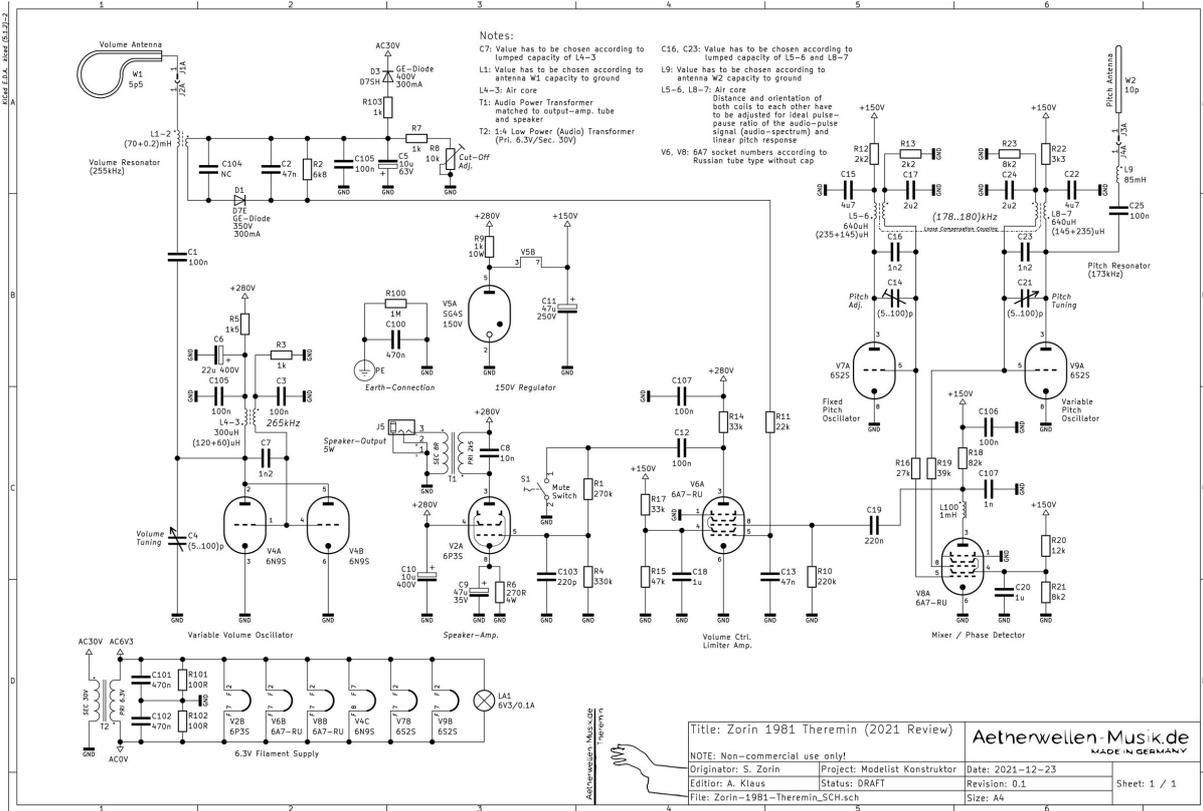


Abbildung 3: Schaltbild des aktuellen, modifizierten Theremin-Instruments nach L.S. Termen (korrigierte Version)

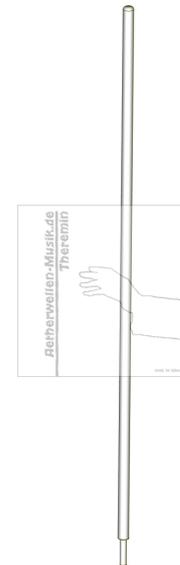
Die Lautstärke-Steuerung und die Endstufe sind im Original-Schaltbild nicht funktionsfähig. R1 ist mit dem Steuergitter von V2 und Masse zu verbinden, nicht parallel zu R4, R1=260k, R4=300k. R7 ist in Reihe mit D3 zu schalten, so dass ich ein Spannungsteiler aus D3, R7 und R8 ergibt (im Schaltplan wurde hier zusätzlich R103 eingefügt), C5 ist an den Verbindungspunkt dieses Teilers zu legen, möglicherweise fehlt der Parallelkondensator (C104) zu L2. Diese Korrekturen sind im oben gezeigten aktualisierten Schaltbild bereits enthalten.

4 Aufbau und Funktion

Nachfolgend werden der grundsätzliche Aufbau und die Schaltungsfunktion beschrieben.

4.1 Steuerung der Tonhöhe

Die Tonhöhe-Stabantenne (L=50cm, D=10mm) soll leicht über dem Kopf des Interpreten enden. Die Anfangskapazität der vertikalen Antennenelektrode zur Tonhöhensteuerung soll ungefähr 10pF betragen und sich bei Annäherung der Hand verdoppeln (*im Original-Text waren hier 100pF angegeben, was für die reine Antennen-Kapazität gegen Erde viel zu hoch ist*).



4.1.1 Tonhöhe-Oszillatoren

Die durch die beiden schwach verkoppelten Hochfrequenzoszillatoren vom Hartley-Typ (*Funktechnik ohne Ballast, Otto Liemann, 10. Auflage, Franzis-Verlag, München, 1969; Abbildung 9.17 „Dreipunkt-Schaltung mit Reihenspeisung“ / Der Empfang kurzer Wellen, H. Günther / H. Kröncke, Franckh'sche Verlagshandlung W. Keller & Co, Stuttgart, 1926; Kapitel 21 „Die praktische Ausführung der Armstrong-Schaltung“, Abbildung 25*) erzeugten Signale werden als „Schwebungstöne“ bezeichnet. Die Frequenz eines der Oszillatoren ist konstant, die des zweiten soll sich proportional mit der Änderung der wirksamen Kapazität des vertikalen Tonhöhen-Antennenstabes bei Annäherung der Hand ändern. Da diese Oszillatoren Funkstörungen verursachen könnten, soll deren Frequenz 180kHz nicht überschreiten.

Abbildung 4: Tonhöhe-Antenne

4.1.2 Gekoppelte Schwingkreise, Ziehen

Um 4,5 Oktaven Tonhöhenbereich umfassen zu können, muss die Frequenz des gesteuerten HF-Oszillators (V9) stark verändert werden. Es wird das Prinzip des „Ziehens“ der Frequenz zweier Schwingkreise angewandt; dies ist im Lehrbuch der Hochfrequenztechnik Band II. (*F. Vilbig, 4. Auflage, Akademische Verlagsgesellschaft Becker & Erler, Leipzig, 1944, Kapitel 9-1-G*) „Die Zieherscheinung“ beschrieben.

Diese gekoppelten Schwingkreise bestehen aus dem Parallel-Oszillator-Kreis von Röhre V9 (L7, L8, C21, C23) und dem Reihenschwingkreis aus Verlängerungsspule L9 mit Eigenkapazität (die so gering wie möglich zu halten ist), sowie kapazitiv wirkender Stabantenne (W2). Dieses Resonanzsystem wird als Viertelwellenresonator bezeichnet, „der nahe seiner Resonanzfrequenz die kapazitive Komponente der Antenne vervielfacht, die auf die Oszillatorschaltung einwirkt“. Allerdings wirkt der gesamte Reihenschwingkreis aus Antenne und Verlängerungsspule als scheinbare veränderliche Induktivität (*und nicht als scheinbare Kapazität*), die einer Teilspule des Oszillator-Schwingkreis parallel geschaltet ist; dieses Verhalten wurde bereits mehrfach auf www.Aetherwellen-Musik.de beschrieben.

In einer resonanznahen Position soll der Einfluss der durch die Annäherung der Hand bewirkten Antennen-Kapazitätsänderung auf die Frequenz des HF-Oszillators aufgrund des Phänomens „Ziehen“ zwischen den beiden Schwingkreisen erheblich zunehmen. Wenn die Kopplung zwischen dem HF-Röhrenoszillator (V9) und dem Antennenresonator,

der aus der kapazitiven Antenne und der Verlängerungsspule mit Eigenkapazität gebildet wird, nahe der Antennen-Resonator-Resonanz zu groß ist, soll ein schlagartiges Umspringen der Oszillator-Frequenz auf die Antennenresonator-Frequenz auftreten können, wie es auch im Lehrbuch der Hochfrequenztechnik Band II. (siehe oben) und im Taschenbuch der Hochfrequenztechnik (H. Meinke / F.W. Gundlach, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin / Göttingen / Heidelberg, 1962, Kapitel R-11) „Gleichzeitige Erregung mehrerer Frequenzen, Frequenzsprünge“ beschrieben wurde. Daher darf diese Kopplung nicht zu groß werden, bzw. die Resonanzfrequenz des Antennenresonators muss weit genug unterhalb der HF-Oszillatorfrequenz bleiben. Allerdings nimmt mit größerem Frequenzabstand die Tonhöhenantennen-Empfindlichkeit auf die Handbewegung ab. Diese Kopplungs- und Frequenzeinstellung hängt auch von der Güte der verwendeten Spulen ab; sie ist sehr kritisch und erfordert viel Verständnis und Geduld beim Abgleich, um einen guten linearen Tonhöhen-Spielbereich zu erhalten.

4.2 Spulen

Die Angegebenen Spulen-Wickeldaten und die im Original-Schaltbild angegebenen Schwingkreiskondensatoren konnten nicht überall mit den üblichen Theremin Frequenzen (170kHz, 260kHz, 450-470kHz) in Übereinstimmung gebracht werden. Es ist davon auszugehen, dass einige der Induktivitätswerte bzw. die angegebenen Wickeldaten falsch sind und nicht verwendet werden können, die Kapazitätsangaben der Schwingkreiskondensatoren aber stimmen. Daher wurden die Spulen neu berechnet. In der Bauanleitung wird mehrfach darauf hingewiesen, dass es sich nur um ungefähre Angaben für die Spulen, insbesondere L3 bis L8 sowie für C16 und C23 handelt und die tatsächliche Windungszahl erst beim Abgleichen des Instrumentes festgelegt werden kann. Auch der Wert der Schwingkreiskondensatoren muss entsprechend der Eigenkapazität bei übereinander liegenden Wicklungen, die durchaus erheblich sein kann und vom mechanischen Aufbau abhängt, gegebenenfalls angepasst werden.

Zur nachträglichen Berechnung der Luftspulen wurden folgende Kalkulatoren benutzt:

<http://electronbunker.ca/eb/InductanceCalc.html>

<http://www.df7sx.de/luftspule/>

<http://electronbunker.ca/eb/InductanceCalcML.html>

4.2.1 Antennen-Verlängerungsspulen

Die Antennen-Verlängerungsspulen für Lautstärke L1 (die Induktivität beträgt laut Berechnung nach originalen Wickeldaten etwa 72mH bei Windungszahl $N=2550$) und Tonhöhe L9 (die Induktivität beträgt laut Berechnung nach originalen Wickeldaten etwa 85mH bei Windungszahl $N=2950$), werden laut Anleitung einlagig mit Kupferlackdraht 0.1mm über die gesamte Länge der Spulenkörper von 60mm Durchmesser und 29,5cm (L1) bzw. 34,0cm Länge (L9) gewickelt. Auf beiden Seiten soll ein Abstand von 8-10 mm für Anschlussklemmen vorgesehen werden. Die Wicklungen sollen zudem durch zwei bis drei Lagen lackierten Stoff oder lackiertes Papier vor mechanischer Beschädigung geschützt werden. Da sich normalerweise die Resonanzfrequenzen von

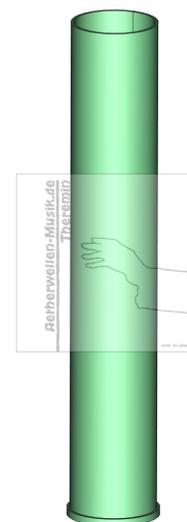


Abbildung 5: Tonhöhe-Antenne Verlängerungsspule L9

Lautstärke und Tonhöhe-Antennenkreis deutlich unterscheiden sollten, um gegenseitige Beeinflussung zu minimieren, sind die für die Lautstärke-Antennenspule angegebenen Wickeldaten mit hoher Wahrscheinlichkeit falsch.

4.2.1.1 Tonhöhe-Oszillatorfrequenz 180kHz

Bei einer Tonhöhe-Oszillatorfrequenz von 180kHz dürfte die Antennenkapazität bei 85mH Antennenspulen-Induktivität etwa 9,2pF betragen, dies kommt den vorgegebenen 10pF sehr nahe. Bei einer Antennenkapazität von 10pF liegt die Antennen-Resonator-Frequenz bei 173kHz (Spule 85mH), also unterhalb der Oszillatorfrequenz, was korrekt ist.

4.2.1.2 Lautstärke-Oszillatorfrequenz 260kHz

Bei einer Lautstärke-Oszillatorfrequenz von 260kHz dürfte die Antennenkapazität bei 72mH Antennenspulen-Induktivität nur etwa 5,2pF betragen, diese erscheint zu gering.

Für eine typische Theremin Lautstärke-Oszillatorfrequenz von 260kHz sollte die Induktivität der Antennenspule bei einer angenommenen Antennenkapazität gegen Erde von 10pF etwa 37,5mH betragen. Daraus ergeben sich eine Windungszahl $N=1400$ und die Wicklungslänge von 16cm.

4.2.1.3 Liegt die Lautstärke-Oszillatorfrequenz nicht doch bei 470kHz ?

Wird die typische Lautstärke-Oszillatorfrequenz auf 470kHz gelegt, dürfte die Antennenkapazität bei 72mH Antennenspulen-Induktivität nur etwa 1,6pF betragen! Dies ist so nicht realisierbar.

Bei einer Induktivität der Lautstärke-Antennenspule L_1 von etwa 14mH wird mit einer angenommenen Antennenkapazität von 8pF die Resonanzfrequenz von 470kHz erreicht. Es sind dann mit dem vorgegebenen Spulenkörperdurchmesser $N=625$ und die Wickellänge 72mm.

Es ist daher wesentlich wahrscheinlicher, dass die Lautstärke-Oszillator-Frequenz bei etwa 260kHz liegen dürfte, da dies auch mit den Original-Wickeldaten unter Beachtung einer geringeren Antennenkapazität um etwa 5pF bis 6pF noch eine geeignete Resonanzfrequenz, die etwas unter der Oszillatorfrequenz liegen muss, erreicht werden kann.

4.2.2 Lautstärkedetektor-Koppelspule

Die Spule L_2 soll mit 30–40 Windungen und Kupferlackdraht 0.1mm Durchmesser auf einen über L_1 verschiebbar angeordneten Spulenkörper gewickelt werden. Hier ergibt sich dann eine Induktivität von etwa 186uH bei $N=35$ und 66mm Spulenkörperdurchmesser. Es wird dann darauf hingewiesen, dass es sich nur um ungefähre Angaben handelt und die tatsächliche Windungszahl erst bei der Inbetriebnahme festgelegt werden kann.

Im Schaltplan ist keine Parallelkapazität eingezeichnet. Bei 260kHz müsste, wenn die Spulendaten korrekt sind,

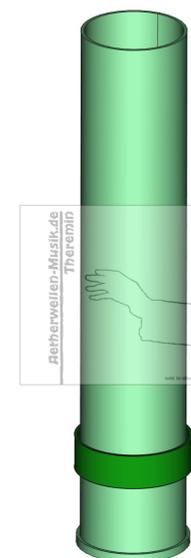


Abbildung 6: Lautstärke-Antenne Verlängerungsspule L_1 mit Koppelspule L_2

ein 2nF Kondensator eingesetzt werden, was aber aufgrund des geringen L/C Verhältnisses unwahrscheinlich ist. Die Erzeugung der Steuerspannung für die Lautstärke beruht auf der Änderung der Lautstärke-Antennenkreis-Resonanzfrequenz bei gleichzeitiger Verschiebung der Lautstärke-Oszillatorfrequenz, wenn die Hand der Antenne genähert wird. Beide Resonanzfrequenzänderungen unterstützen sich, so dass eine ausreichende Empfindlichkeit und Bandbreite, trotz des fehlenden Sekundär-Parallel-Schwingkreises (es ist ja nur die Koppel-Spule ohne Parallelkondensator vorhanden, die auf der Antennenspule sitzt und mit ihr einen Transformator mit geringem Kopplungsfaktor bildet), plausibel ist.

4.2.3 Lautstärke-Oszillatortspulen

Auf ähnliche Spulenkörper, wie sie für die Tonhöhe-Oszillatortspulen benutzt werden, sollen die Spulen L3 und L4 jeweils in entgegengesetzter Richtung gewickelt werden, bei 60mm (Original-Text 30mm) Durchmesser mit jeweils 20 (L3=47uH, N=20) und 30 (L4=100uH, N=30) Windungen 0,15mm Kupferlackdraht. Die Gesamtinduktivität beträgt dann etwa 216uH (Kopplungsfaktor 0,5).

Werden die im Original-Text angegebenen Werte verwendet, ergeben sich L3=23uH, L4=45uH und damit eine Gesamtinduktivität von etwa 100uH. Daraus ergibt sich zusammen mit den im Schaltplan angegebenen wirksamen Schwingkreiskapazitäten, die zusammen bei etwa 150pF liegen, eine typische Resonanzfrequenz von 1,3MHz; also viel zu hoch!

Entsprechend der Parallelkapazität von typisch 150pF ergibt sich bei Verwendung veränderter Spulendurchmesser (Gesamtinduktivität 675uH) eine Oszillator Frequenz von etwa 500kHz. Diese läge im Erwartungsbereich von typischen Theremin-Frequenzen um 470kHz. Nun ist aber die Lautstärke-Antennenverlängerungsspule, wie oben ausgeführt, für etwa 260kHz dimensioniert. Wenn der Lautstärke-Oszillator auf etwa 260kHz schwingen soll, muss z.B. die Induktivität bei 2,5mH liegen, wenn der Parallelkondensator von 150pF beibehalten werden soll. Werden 675uH beibehalten, muss der Parallelkondensator 555pF betragen.

Es wird vermutet, dass im Original-Text anstelle des Spulendurchmessers (60mm) der Spulendurchmesser (30mm) angegeben worden ist. Es ergeben sich dann für L3 und L4 etwa 47uH (N=20) und für L4 etwa 100uH (N=30). Daraus berechnet sich die Gesamtinduktivität zu 216uH (Kopplungsfaktor 0,5). Für 260kHz muss dann ein Kondensator von 1,7nF parallelgeschaltet werden. Im Schaltplan sind ein 120pF Kondensator parallel und ein 5pF bis 100pF Drehkondensator parallel zum Anodenkreis (der sich daher nicht voll auf den Schwingkreis auswirkt) geschaltet. Wenn die Vermutung richtig ist, dass statt 120pF ein 1200pF Kondensator eingesetzt werden muss und die Windungszahlen stimmen, so ergibt sich zusammen mit der 216uH Schwingkreisinduktivität eine Resonanzfrequenz von 313kHz, die den 260kHz schon nahe kommt; die Oszillatorfrequenz muss etwas über der Antennen-Reihenschwingkreis-Frequenz liegen, was daher auch korrekt ist. Wird ein höherer Spulenkopplungsfaktor für die Berechnung der Gesamtinduktivität verwendet, erhöht sich die Induktivität und die Resonanzfrequenz verringert sich, kommt also der angenommenen Frequenz von 260kHz, bei beibehaltenem Kondensatorwert, noch näher.

Die Schlussfolgerung ist also, dass unter Beibehaltung der Windungszahlen (20 und 30) bei korrigiertem Spulendurchmesser auf 60mm und Verwendung eines 1200pF (Fest-) Kondensators die notwendige Lautstärke-Oszillatorfrequenz um 260kHz erreicht werden kann.

Der Wert des Schwingkreiskondensators muss entsprechend der Eigenkapazität bei übereinander liegenden Wicklungen, die durchaus erheblich sein kann und vom mechanischen Aufbau abhängt, gegebenenfalls angepasst werden.

4.2.4 Werte für Lautstärke-Oszillator-Spulen, Schwingkreiskondensator und Antennenspule

Im aktualisierten Schaltplan wurden Oszillator-Spulen-Werte von $(120+60)\mu\text{H}$, die bei einem Kopplungsfaktor von 0,7 die Summeninduktivität von $300\mu\text{H}$ ergeben, gewählt. Zusammen mit dem maßgebenden Schwingkreiskondensator von $1,2\text{nF}$ wird damit eine Lautstärke-Oszillatorfrequenz von 265kHz erreicht. Mit Antennenkapazität von 6pF und Antennen-Verlängerungsspule von 70mH ist der Frequenzhub bis zu 1kHz .

4.2.5 Tonhöhe-Oszillatortspulen

Die Tonhöhe-Oszillatortspulen L5 und L7 (Anodenkreis) sollen mit einer Papierschicht abgedeckt, L6 und L8 (Gitterkreis) soll in entgegengesetzter Richtung darüber gewickelt werden, jeweils mit $0,15\text{mm}$ Kupferlackdraht. Mit den im Original-Text angegebenen Windungsdaten (Spulenkörperdurchmesser 30mm , Länge 50mm , Windungszahlen $L5/L7=60$; $L6/L8=40$) ergeben sich $L5/L7=136\mu\text{H}$ und $L6/L8=72\mu\text{H}$. Die Gesamtinduktivität beträgt etwa $307\mu\text{H}$, die Resonanzfrequenz 257kHz mit Parallelkondensator von $1,25\text{nF}$. Die Resonanzfrequenz sollte (entsprechend des Antennenresonanzkreises) zwischen 170kHz und 180kHz liegen, ist also deutlich zu hoch!

Mit Spulenkörpern von 60mm Durchmesser sind $L5/L7=360\mu\text{H}$ und $L6/L8=185\mu\text{H}$. Es ergibt sich dann eine Gesamtinduktivität von etwa $800\mu\text{H}$ und mit dem Parallelkondensator von $1,25\text{nF}$ eine Resonanzfrequenz von etwa 160kHz , diese liegt etwas zu niedrig. Mit Spulenkörpern von 50mm Durchmesser sind $L5/L7=280\mu\text{H}$ und $L6/L8=145\mu\text{H}$. Es ergibt sich dann eine Gesamtinduktivität von etwa $625\mu\text{H}$ (Kopplungsfaktor 0,5) und mit dem Parallelkondensator von $1,25\text{nF}$ eine Resonanzfrequenz von etwa 180kHz , diese liegt etwas zu hoch; wenn der Kopplungsfaktor etwas höher ist steigt die Gesamtinduktivität und die Resonanzfrequenz sinkt etwas ab.

Der Wert des Schwingkreiskondensators muss entsprechend der Eigenkapazität bei übereinander liegenden Wicklungen, die durchaus erheblich sein kann und vom mechanischen Aufbau abhängt, gegebenenfalls angepasst werden.

4.2.6 Werte für Tonhöhe-Oszillator-Spulen, Schwingkreiskondensatoren und Antennenspule

Grundsätzlich lassen sich Spulen schwer berechnen; es gibt hier diverse Formeln und Lösungsansätze. Es wurden folgende Daten ermittelt, die als Richtwerte dienen können:

Mit Spulenkörpern zwischen 50mm und 60mm Durchmesser und Lackdraht $0,15\text{mm}$ sind $L5/L7=145\mu\text{H}$ bei $N5/N7=40$ und $L6/L8=235\mu\text{H}$ mit $N6/N8=50$. Es ergibt sich dann eine Gesamtinduktivität von etwa $640\mu\text{H}$ (bei Kopplungsfaktor $k=0,7$).

Um Feuchtigkeits- und Temperaturschwankungen auszugleichen, müssen die Spulen der Tonhöhe-Oszillatoren identisch ausgeführt werden.

Im aktualisierten Schaltplan wurden die Tonhöhe-Oszillator-Spulen-Werte von $(235+145)\mu\text{H}$, die bei einem Kopplungsfaktor von 0,7 die Summeninduktivität von $640\mu\text{H}$ ergeben, eingetragen. Zusammen mit dem Schwingkreiskondensatoren sowie Antennenkreis wird damit eine Tonhöhe-Oszillatorfrequenz von 178kHz (*Hand von*

Antenne entfernt) erreicht. Mit Antennenkapazität von 10pF und Antennen-Verlängerungsspule von 85mH sollte der Frequenzhub größer 1,6kHz sein.

4.2.7 Ferritstäbe

Des weiteren wird darauf hingewiesen, dass die Antennen-Spulen L1 (72mH) und L9 (85mH) auch auf Ferritstäbe mit etwa 140mm Länge und 10mm Durchmesser unter Verwendung von 0,06mm Kupferlackdraht gewickelt werden könnten. Zwischen Wicklung und Ferritstab soll eine Schicht Papier von 1mm Stärke vorgesehen werden (12mm Spulenkörper-Durchmesser). Es wurden keine Wicklungslängen oder Windungszahlen angegeben. Diese hängen stark von den Eigenschaften der verwendeten Ferritantennen-Stäbe ab; typischerweise sollte von einer Anfangspermeabilität von 50 ausgegangen werden.

Für L1=72mH mit 12mm Spulenkörper-Durchmesser, 0,06mm Kupferlackdraht und Anfangspermeabilität des Stabes von 50/100/300 ergibt sich eine Windungszahl (N) von etwa 580/300/100 (Wicklungslänge 40/20/8mm).

Für L9=85mH mit 12mm Spulenkörper-Durchmesser, 0,06mm Kupferlackdraht und Anfangspermeabilität des Stabes von 50/100/300 ergibt sich eine Windungszahl (N) von etwa 690/340/120 (Wicklungslänge 45/25/10mm).

Zur nachträglichen Berechnung der Ferritspulen wurde „Wege in die Elektronik“ (*J. Glagla / G. Lindner, Otto Maier Verlag, Ravensburg, 1980*) benutzt.

4.3 Transformatoren

Für T1 soll ein Tonendstufen-Ausgangsübertrager (aus einem Röhrenradio) verwendet werden können. Der Transformator T2, der die negative Hilfsspannung erzeugt, soll an seiner Sekundärwicklung 30V abgeben, wenn an seiner Primärwicklung 6,3V anliegen.

4.4 Röhren

Die Konstruktion des Theremin-Instruments von 1921 (RCA) wird im Jahre 1981 (Veröffentlichung der Bauanleitung) als nicht mehr reproduzierbar bezeichnet. Es sollten daher vergleichbare (russische) Röhren verwendet werden. Auch wenn die Typenbezeichnungen der russischen Röhren offenbar amerikanischen Paralleltypen entsprechen, so können doch Abweichungen (z.B. Sockel- oder Elektrodenbeschaltung) vorhanden sein, wie dies bei der **6A7** der Fall ist.

Die im Tonhöhe-Oszillator verwendete Triode **6S2S** entspricht etwa $\frac{1}{2}$ **ECC82**. Die beiden Systeme der ECC82 sind nicht besonders gegeneinander abgeschirmt, daher müssten zwei Einzelröhren (jeweils nur ein System) verwendet werden.

Es ist unklar, warum nicht auch die 6S2S Triode im Lautstärke-Oszillator verwendet wurde. Oszillator-Frequenz und Leistung unterscheidet sich nur unwesentlich; möglicherweise wurde die Oszillatorschaltung mit der Doppel-Triode **6N9S** vormals verwendet, um einen anderen Lautstärkeregelkreis mit höherem HF-Strombedarf zu betreiben (*HF-Röhrenheizung wie beim RCA-Theremin*). Die Endstufenröhre **6P3S** entspricht etwa der **6L6**.

4.5 Mischstufe

Die zu mischenden Signale werden zur Misch-Heptode V8 Typ 6A7 (6A2P) geführt, deren Steuergitter über die Widerstände R16 und R19 von jeweils 10–50kΩ mit den Steuergittern der V7 und V9 Oszillorröhren verbunden sind. In der Anodenleitung befindet sich in der Original-Schaltung keine Induktivität (Zwischenstufen-Transformator oder Drossel) zur Integration des dort erzeugten HF-Pulses, wie sie im Rockmore/Rosen und RCA Theremin verwendet wurde. Dies führt dazu, dass der HF-Puls (Burst) über die Begrenzerverstärker-Röhre und die Endstufenröhre bis zum Ausgangstransformator geführt wird, der den Puls zusammen mit dem parallel liegenden Kondensator integriert und an dessen Lautsprecheranschluss dann der Niederfrequente Puls abgenommen werden kann. Es werden so große HF-Burst Signale zur Endstufenröhre geleitet und verstärkt, was zu erheblichen Störungen führen kann. Es ist daher eher wahrscheinlich, dass zumindest ein RC-Glied als HF-Filter vor dem Gitter der Endstufenröhre im Schaltplan vergessen wurde; dieses wurde im aktualisierten Schaltplan ergänzt (C103). An dieser Stelle liegt sowieso ein Fehler im Original-Schaltplan vor, da R1 und R4 hier parallel geschaltet sind, was so nicht plausibel ist. Es wurde zusätzlich ein LC-Glied, bestehend aus Drossel L100 und Kondensator C107 in den Anodenkreis der Röhre V8 aufgenommen, um HF Störungen weiter zu reduzieren.

4.5.1 Audio-Spektrum und Kopplungs-Kompensation

Die Zusammensetzung der Harmonischen (Obertöne) im Ausgangssignal an der 6A7 (6A2P) Mischröhrenanode und der Kopplungsgrad zwischen den Oszillatoren soll sich durch die Werte der Widerstände (R16 / R19) an den Steuergittern von V8 einstellen lassen. Dass die Zusammensetzung der Harmonischen vom Puls-Pausenverhältnis des Audio-Signals abhängt wird nicht erwähnt, dafür wird dann aber auf die Kopplung zwischen den Oszillatoren hingewiesen, die durch Auswahl der Kondensatorwerte von C16 und C23 (Schwingkreis-Kondensatoren der Oszillatoren) sowie verändern der relativen Position der Oszillator-Spulen L5 / L6 und L7 / L8 zueinander vergrößert oder verkleinert werden kann, um den Tieftonbereich des Instruments einzustellen. Diese (Phasen-) Kompensation der zwischen den Oszillatoren koppelnden HF-Signale (die zu Synchronisationseffekten im unteren Frequenzbereich des Theremin führen können) mittels mechanisch veränderlicher Position der Oszillatorspulen zueinander, wurden bereits ausführlich auf www.Aetherwellen-Musik beschrieben.

4.6 Antennenspulen-Abgleich

Der Abgleich der Antennenspulen erfolgt üblicherweise so, dass mit großem Induktivitätswert (volle Windungszahl) begonnen wird. Die Antennenspulen-Induktivität wird dann durch Abwickeln von Windungen so weit verringert (bei immer wieder auf den Sollwert z.B. 170kHz nachgestellter Oszillator-Frequenz), bis eine optimale Handempfindlichkeit (voller Spielbereich) erreicht wird. Bei dieser Vorgehensweise werden die Resonanzfrequenzen einander immer mehr angenähert; die des Antennenkreises von niedrigen, die des Oszillators von hohen Frequenzen aus, bis sie nahe beieinander liegen, ohne das beim Annähern der Hand und Antennenberührung ein Springen der Oszillatorfrequenz auftritt. Auch beim Aus- und Wiedereinschalten des Geräts darf kein Springen oder Festhängen der Oszillatorfrequenz auf einer anderen als der zuvor eingestellten auftreten. Sollte dies doch der Fall sein, sind die Frequenzen von Oszillator und Antennenkreis zu dicht beieinander und es müssen wieder Windungen zur Antennenspule hinzu gewickelt werden, um die Induktivität zu erhöhen. Versuchsweise kann auch die Oszillatorfrequenz verändert werden, bis das Springen nicht mehr auftritt,

sofern die Oszillatorfrequenz weiter im gewünschten Frequenzbereich bleibt. Es ist auch möglich, in Reihe zur Antennenspule eine weitere kleine Spule mit Abgleichkern zu schalten, um die Einstellung bequemer vornehmen zu können.

4.7 Steuerung der Lautstärke

Das Signal der Misch-Röhre V8 gelangt zur Lautstärke-Regel-Heptode V6 Typ 6A7 (6A2P). Die Höhe der negativen Vorspannung am ersten (*im Original Text: zweiten*) V6-Steuergritter bestimmt die Lautstärke des Tons. Dazu variiert die linke Hand die Kapazität der schleifenförmigen Antenne W1, die die Frequenz des Schwingkreises L1 / C1 beeinflusst. Der Oszillator, der die Hochfrequenz zur Lautstärkeregelung liefert, besteht aus der Doppeltriode V4 Typ 6P9S (6P8S).

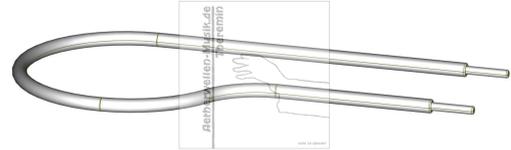


Abbildung 7: Lautstärke-Antenne

Wenn die Hand sich in einem Abstand von einem halben Meter über der schleifenförmigen Antennenelektrode W1 befindet, soll der Lautstärke-Schwingkreis nahezu in Resonanz sein (*größte Lautstärke*). Es soll dann eine positive Vorspannung von +1V bis +2V am zweiten (*und vierten*) Gitter (*den Schirmgittern*) von V6 anliegen. Das Annähern der linken Hand verstimmt die Resonanz und soll zum Ansteigen dieser Vorspannung auf +15V bis +20V führen.

Im original Text soll die Vorspannung bei Resonanz +15V bis +20V betragen, entsprechend hohe Lautstärke. Beim Absenken der Hand und verstimmter Resonanz soll die Spannung auf +1V bis +2V absinken, entsprechend niedriger Lautstärke. Dies kann so nicht stimmen, da die Röhre V6 neben der Resonanz, also niedriger Lautstärke bei angenäherter Hand an die Lautstärke-Antenne, über die dann stark negative Steuerspannung an Gitter 1 zunehmend gesperrt wird und somit kaum Anoden- und Schirmgitterstrom fließt – der Schirmgitter-Spannungsteiler wird hier, bei geringer Lautstärke, nicht mehr, sondern weniger belastet; die Schirmgitterspannung steigt somit an. Es liegt hier „gleitende Schirmgitterspannung“ vor.

Auf die Erzeugung der Lautstärke-Steuerspannung wird im Original-Text nicht eingegangen, daher folgt nun eine kurze Beschreibung: Von der Hilfsspannungserzeugung um T2 und D3 wird eine relativ konstante, mit R8 abgleichbare negative Spannung von etwa -25V erzeugt, die am kalten Ende der mit der Lautstärkeantennenverlängerungsspule verbundenen Lautstärkedetektor-Koppelspule liegt. Bei voller Lautstärke, also Antennenresonator in Resonanz, ist die HF-Amplitude an der Koppelspule am größten. Diese Hochfrequenzspannung wird durch D1 gleichgerichtet, C2 stellt den Ladekondensator dar. Am Widerstand R2 liegt die vom Handabstand zur Lautstärke-Antenne abhängige Streuspannung an. Diese ist positiv, bezogen auf das kalte, für Hochfrequenz durch C105 geerdete, Ende der Koppelspule. Sie addiert sich zur negativen Hilfsspannung, kompensiert diese also; gegen Masse gemessen entsteht so eine Lautstärke-Steuerspannung, die von etwa -25V (leise) bis -2V (laut) reichen sollte. Die (negative) Steuerspannung wird Gitter 1 von V6 über den Tiefpass, der aus R11 und C13 gebildet wird, zugeführt. V6 wird entsprechend mehr oder weniger verstärkt; ist die Spannung stark negativ, wird die Röhre voll gesperrt und es gelangt kein Niederfrequenzsignal mehr zur Endstufenröhre V2.

4.8 Klangfarben-Beeinflussung

In der Bauanleitungs-Schaltungsbeschreibung wird dann von Klangfarbenbeeinflussungsschaltungen berichtet, die aber im Originalschaltplan nicht enthalten sind. Es wird von Resonanz-Formantenkanälen im Bereich von 500Hz bis 3kHz gesprochen.

4.9 Endstufe

Die Leistungsverstärkung des Tonsignals erfolgt durch die Endstufenröhre (6P3S oder 6P14P). Parallel zur Primärwicklung des Ausgangstransformators T1 liegt ein Kondensator von 10nF (C8), der HF-Reste unterdrückt. Gleichfalls bewirkt er zusammen mit T1 Tiefpass- und Resonanz-Effekte, die den Klangcharakter des Theremins beeinflussen.

4.10 Abgleich

Zur Stimmung des Instruments sollen die variablen Kondensatoren C14 und C21 dienen, die hinter der in der Bauanleitung nicht näher beschriebenen Frontplatte sitzen.

Wenn die Hand von der Stabantenne weit entfernt ist, soll die untere Tongrenze eingestellt werden. Wird die Hand dann der Antenne genähert, soll die Tonhöhe gleichmäßig zunehmen. Eine falsche Einstellung soll den gegenteiligen Effekt bewirken, der Ton soll bei Annäherung tiefer werden.

Mit der linken Hand soll die Lautstärke beeinflusst werden, so dass sich die maximale Lautstärke beim Anheben auf 30-40cm und die minimale beim Absenken der linken Hand auf ca. 8cm über der schleifenförmigen Antenne W1 ergibt. Dies entspricht auch der Lautstärke Funktionalität von bereits ausführlich auf www.Aetherwellen-Musik beschrieben Schaltungen.

4.11 Stumm-Schalter

Wenn der auf der Frontplatte befindliche Stummschalter S1 betätigt wird, der dazu dient das Tonsignal in Spielpausen zu unterbrechen, bleibt die Röhrenschaltung weiterhin in Betrieb, um das erneute Warmlaufen der Röhrenoszillatoren zu vermeiden.

4.12 Netzteil, Endstörmaßnahmen und Erdung

Das nicht näher beschriebene Netzteil soll eine gut gesiebte Anodenspannung von +250V bis +300V bei einem Strom von 75mA bis 100mA liefern können. Auf die im Schaltplan befindliche 150V Stabilisator-Röhre V5, die die Tonhöhe-Oszillatoren versorgt, wird nicht eingegangen. Die Heizwicklungsanschlüsse (6,3V / 2,5A) sollen durch Kondensatoren mit einer Kapazität von 0,5µF symmetrisch mit der Geräte-Masse verbunden werden, die wiederum selbst über einen ähnlichen Kondensator mit dem Netz-Schutzleiter (*PE, Erdung*) verbunden ist. Dies ist aber im Original-Schaltbild nicht dargestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass dies notwendig sei, „um die korrekte Position des Hochfrequenz-Spannungsknotens in den stehenden Wellen der Antennen zu erhalten“. Das hochfrequenztechnisch kalte Ende der Antennenschwingkreise wird geerdet, wie dies auch bei Radiosendern der Fall ist und die Hochfrequenz wird somit nur am heißen Ende, den Antennen, voll wirksam. Die Hände des Musikers können ebenfalls über seinen Körper und den Fußboden als geerdet betrachtet werden, auch wenn dies nur sehr hochohmig der Fall ist. Insbesondere bei dem vorgestellten Theremin-Instrument, das mit Röhren und hohen Spannungen arbeitet, hat die hochohmige Erdung des Musikers wenig

Einfluss auf den Spielbereich, da hier an den Antennen bei Resonanz hochfrequente Hochspannungen anliegen (*bis zu einigen hundert Volt*), die relativ große Hochfrequenzströme zwischen Antenne und Erde - Hände und „geerdeter“ Körper des Musikers, bewirken. Diese sind aber selbst bei Berührung der Antennen für den Menschen aufgrund des Skin-Effektes unschädlich; der Hochfrequenz-Strom fließt nur an der Körperoberfläche. Darüber hinaus brechen die Spannungen bei Berührung sofort zusammen, da dann keine Resonanz mehr vorliegt.

4.13 Ständer

Das fertiggestellte Theremin im U-förmigen Gehäuse, dessen Höhe 45,5cm, Breite 42cm und Tiefe 13cm beträgt, soll auf den dafür vorgesehenen Ständer gestellt werden, der die Höhe des Instruments an die Größe des Musikers anpasst. Der Ständer ist 46cm hoch, 42cm breit und 13cm tief.

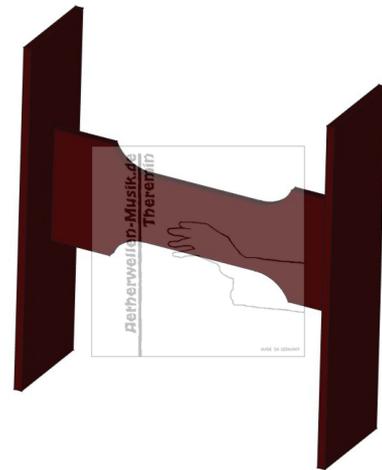


Abbildung 8: Ständer

4.14 Lautsprecher und Schallwand

Ein Lautsprecher mit einer Leistung von 5 bis 10W soll hinter das Mittenloch einer Schallwand von 55cm × 50cm montiert werden. Er soll sich etwa in Höhe des Kopfes des Spielers in einem Abstand von 1m befinden. Unterhalb dieser, von einem Stativ getragenen Schallwand, soll das nicht näher beschriebene Netzteil (*mit Netzkabel, Netzschalter und Sicherungen*) montiert und über Kabel und Stecker mit dem Instrument verbunden werden. Schallwand und Stativ nicht in den Maßskizzen angegeben.

5 Mechanischer Aufbau

Die Original-Bauanleitung enthält Skizzen, aus denen sich die Form und die Maße entnehmen lassen, sie werden hier nicht wiedergegeben.

5.1 Gehäuse und Ständer

In den Original-Zeichnungen des mechanischen Aufbaus (*Zeichnung der Mechanikteile*), sind die folgende Komponenten enthalten:

- 1 – Rückwand 445 x 420 x 5 (1x)
- 2 – Frontplatte 445 x 420 x 5 (1x)
- 3 – Seitenwand 445 x 120 x 5 (2x)
- 4 – Lautstärke-Antenne 300 x 10 mit Innendurchmesser 150 (1x)
- 5 – Deckenplatte groß 120 x 260 x 5 (1x)
- 6 – Innenwand 120 x 210 x 5 (2x)
- 7 – Tonhöhe-Antenne 500 x 10 (1x)
- 8 – Deckenplatte klein 130 x 85 x 5 (2x)
- 9 – Bodenplatte 130 x 420 x 5 (1x)
- 10 – Ständerbrett 460 x 130 x 10 (2x)
- 11 – Ständer-Zwischenbrett 150 x 400 x 10 (1x)

Die Maße sind in den Zeichnungen der Bauanleitung in Millimetern (mm) angegeben, das U-förmige Gehäuse des Instruments soll aus 5mm starkem Sperrholz, der passende Ständer aus 10mm starkem Vollholz bestehen. Es werden hier vereinfachte Maße angegeben mit Länge x Breite x Höhe (L x B x H) oder Länge x Durchmesser (L x D).



Abbildung 9: Gehäuse mit Ständer

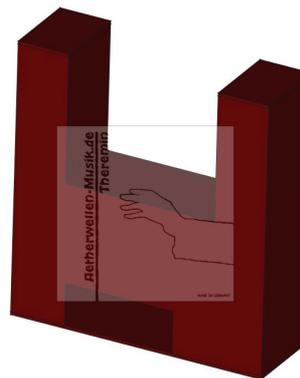


Abbildung 10: Gehäuse

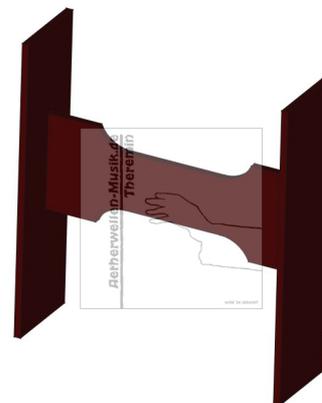


Abbildung 11: Ständer

5.2 Chassis

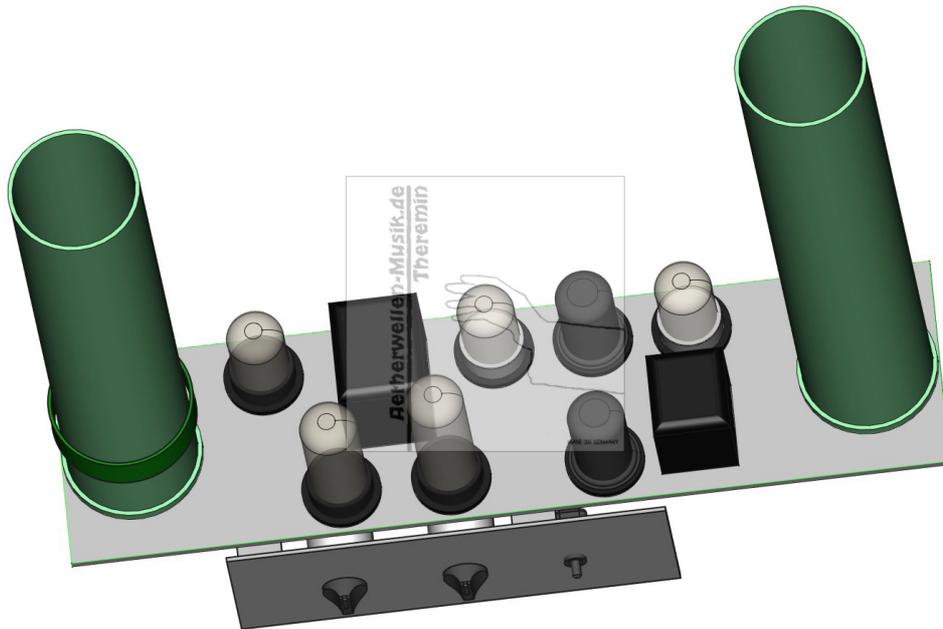


Abbildung 12: Chassis mit Frontplatte

Das Chassis, welches die elektronischen Bauteile trägt, soll aus einer horizontalen Metallplatte (400 x 100 x 4)mm bestehen, die im Instrumentengehäuse befestigt ist. Sie soll folgende Komponenten tragen:

- L1/L2 – Lautstärke-Verlängerungsspule 315 x 60
- L9 – Tonhöhe-Verlängerungsspule 360 x 60
- S1 – Stumm-Schalter
- V2 – Endstufenröhre 6P3S
- V4 – Lautstärke-Oszillator-Röhre 6N9S
- V5 – Glimmstabilisatorröhre SG4S
- V6 – Lautstärkekontrollröhre 6A7
- V7 – 1. Tonhöhe-Oszillatorröhre 6S2C
- V8 – Phasendetektor/Mischröhre 6A7
- V9 – 2. Tonhöhe-Oszillatorröhre 6S2C
- C4 – Lautstärke-Drehkondensator
- C14 – Tonhöhe-Abgleich Trimmer
- C21 – Tonhöhe-Drehkondensator
- R8 – Lautstärkeeinsatz-Trimmer
- T1 – Trafo Endstufe
- T2 – Trafo Negative Vorspannung

Alle Maße sind in den Original-Zeichnungen der Bauanleitung in Millimetern (mm) angegeben, die Röhrensockel-Ausschnitte sollen 32mm Durchmesser haben. Es werden hier vereinfachte Maße angegeben mit Länge x Breite x Höhe (L x B x H) oder Länge x Durchmesser (L x D).

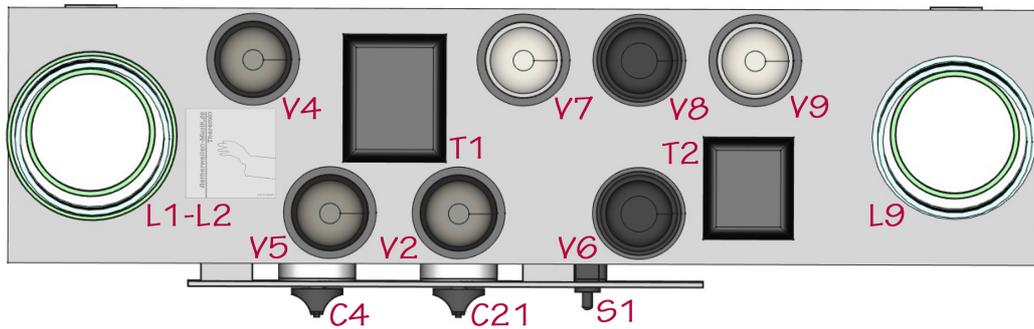


Abbildung 13: Chassis (oben)

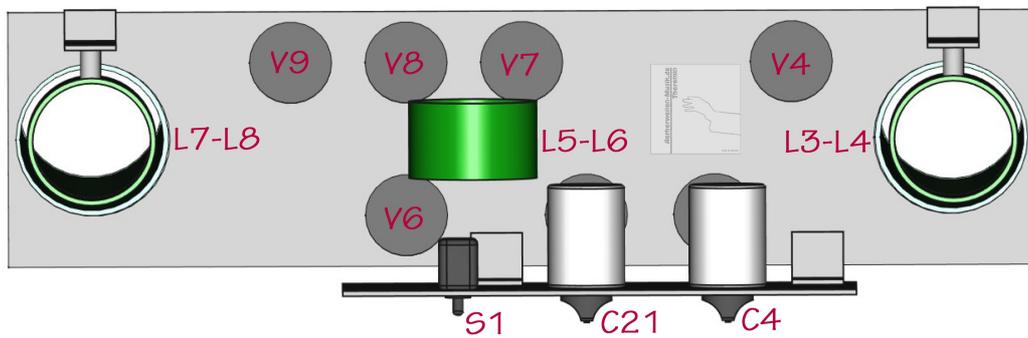


Abbildung 14: Chassis (unten)

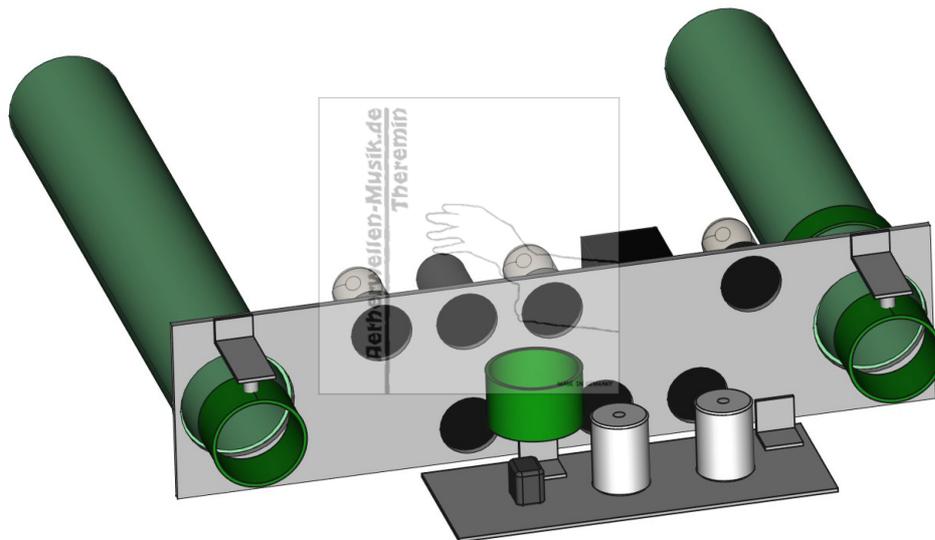


Abbildung 15: Chassis Komponenten-Anordnung auf Unterseite

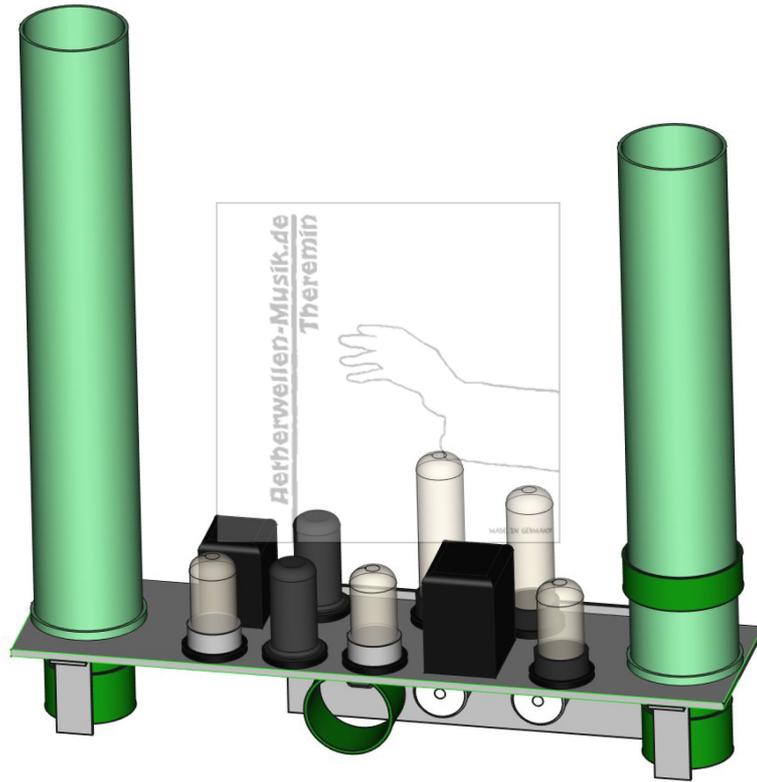


Abbildung 16: Chassis-Aufbau (Rückseite)

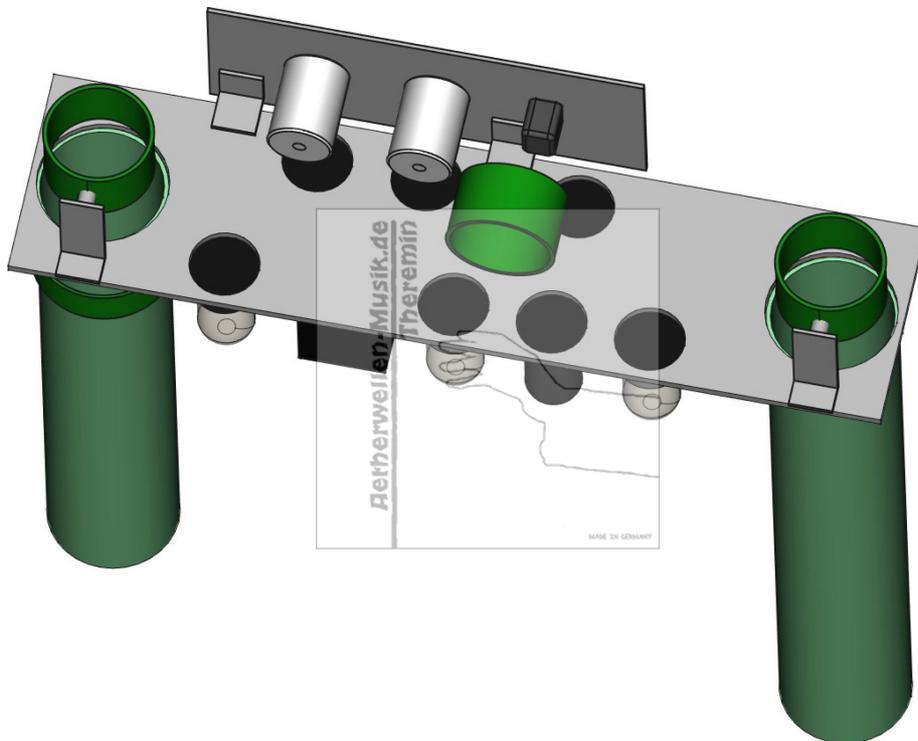


Abbildung 17: Chassis-Aufbau (Unterseite)

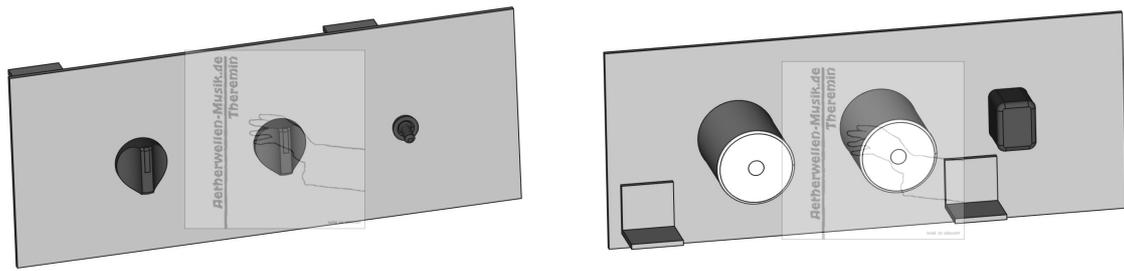


Abbildung 18: Frontplatte (vorne / hinten)

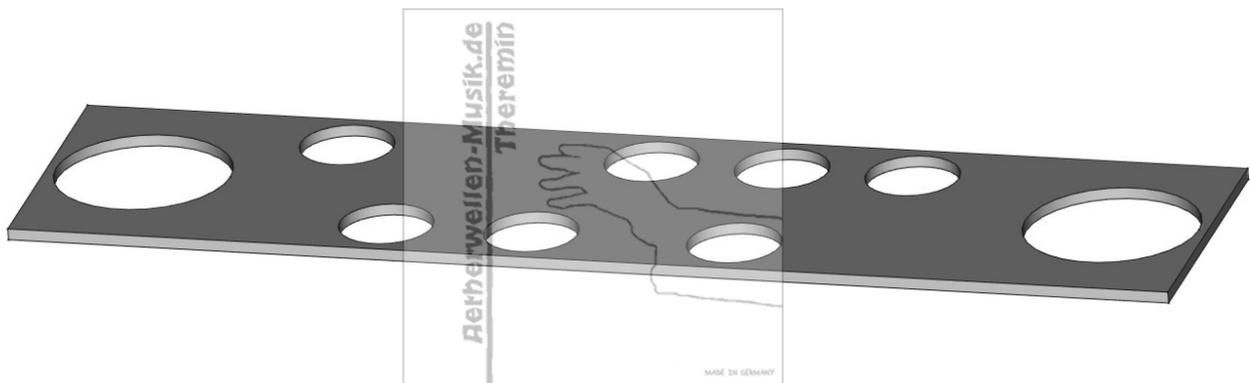


Abbildung 19: Chassis-Platte

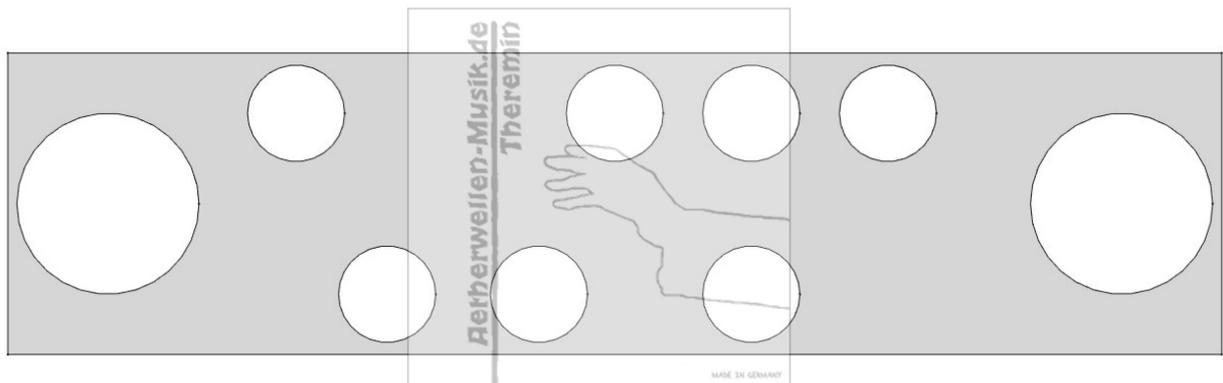


Abbildung 20: Chassis-Platte (oben)

6 Änderungen

4.4 ... 6S2S Triode im *Tonhöhe*-Oszillator verwendet wurde. → ... 6S2S Triode im *Lautstärke*-Oszillator verwendet wurde.