

# Allgemeine Funktionsweise der Rockmore- und Rosen Röhren-Theremin Instrumente entsprechend Leon Theremin's Design

© A. Klaus [aetherwellen-musik.de](http://aetherwellen-musik.de) 12.2021 Version 1.1  
[info.aetherwellen-musik@t-online.de](mailto:info.aetherwellen-musik@t-online.de)

## Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	2
1.1	Zusätzliche Erläuterungen.....	2
2	Rockmore- und Rosen Röhren-Theremin Schaltpläne.....	3
3	Schaltungsfunktion.....	6
3.1	Tonhöhen HF-Oszillatoren.....	6
3.1.1	Störeinkopplung.....	7
3.1.2	Netzbrumm.....	7
3.1.3	Oszillator-Spulen.....	7
3.1.4	Kopplungs-Trimmer und Phasenkompensation.....	8
3.1.5	Oszillator-Amplitude Regelkreis.....	8
3.1.6	Tonhöhen-Antenne und zugehörige Verlängerungsspule.....	8
3.1.7	Frequenzsprünge.....	11
3.1.8	Warum 170kHz ?.....	11
3.2	Tonhöhen-Phasendetektor.....	11
3.2.1	Multiplikative Mischung.....	12
3.2.2	Additive Mischung.....	12
3.2.3	Phasendetektor mit 24A' Tetroden-Röhre.....	12
3.2.4	Phasendetektoren mit Röhren für FM-Demodulation.....	12
3.2.5	Verkopplung der Tonhöhen-Oszillatoren über die Phasendetektor-Röhre.....	12
3.2.6	Unterschied von Schwebung und Amplitudenmodulation (AM).....	13
3.2.7	Wirkung von Phasendetektor und Phasenkompensation.....	13
3.3	Audiosignal Begrenzerverstärker.....	14
3.3.1	Lautstärkeabhängiges Klangspektrum.....	15
3.4	Lautstärke Detektor.....	15
3.4.1	Detektor-Schwingkreiskopplung an die Verlängerungsspule.....	15
3.4.2	Dynamische Lautstärkesteuerung (Über-/Unterschwingen).....	16
3.4.3	Detektor Gittervorspannungs-Batterie.....	16
3.4.4	Stummschaltung.....	16
3.4.5	Erzeugung der Lautstärke-Steuerspannung.....	16
3.4.6	Lautstärke Stummschaltungs-Batterie.....	17
3.4.7	Unerwünschte „Geister-Töne“ .....	17
3.5	Lautstärke-Oszillator.....	17
3.6	Lautstärke-Antenne und Verlängerungsspule.....	17
3.7	Warum 455kHz ?.....	17
3.8	NF-Leistungsverstärker.....	17
3.8.1	Rockmore-Theremin Endstufe.....	18
3.8.2	Tiefpass-Filter.....	18
3.8.3	Rosen-Theremin Endstufe.....	18
3.8.4	Zusammenwirken von Endstufe und Lautsprecher.....	19
3.9	Lautsprecher.....	19
3.10	Tonhöhen-Anzeige (440Hz) .....	19
3.10.1	Verstärker und 440Hz Resonator.....	19

3.10.2 Neon-Anzeige.....	20
3.11 Bedienelemente auf der Frontplatte.....	20
3.12 Netzteil.....	20
3.12.1 Anodenspannungen.....	20
3.12.2 Röhrenheizung.....	20
3.12.3 Netzschalter und Netz-Entstörung.....	21
4 Röhren.....	21
4.1 Verstärkungsfaktor der Röhren.....	21
4.2 Regel-Röhren.....	21
4.3 Konfiguration der Pentode als Tetrode oder Triode.....	21
4.4 Verwendung von Röhren in Theremin-Schaltungen.....	21
5 Spulen.....	21
5.1 Luftspulen.....	22
5.2 Ferritstäbe und Kammer-Spulenkörper.....	22
6 Audiotransformatoren.....	22
6.1 Breitband-Transformatoren.....	22
6.2 Netztransformator als Phasendetektor-Zwischentransformator.....	22
7 Klanganalyse.....	23
7.1 Direktaufnahmen.....	23
7.2 Signale im Zeit- und Frequenzbereich.....	23
7.3 Klangspektren.....	23
7.4 Flüstern und Schreien.....	24
7.5 Quelle des untersuchten Audiosignals.....	24
7.6 „Rockmore“- Spektralsignatur.....	24
7.7 Blas-Synthesizer REALTON „Variophon“.....	25
7.8 Rechteckimpulse zur Klangformung bei L.D. Koroljow und R. Moog.....	25
7.9 EW Standard Theremin Klangfarbe.....	25
7.10 RCA Theremin Klangfarbe.....	25
7.10.1 RCA Radiola 106 Lautsprecher.....	26
7.10.2 Audio-Zwischentransformatoren.....	26
7.10.3 Verzerrungen und Formant-Effekte.....	26
8 Fazit.....	26
9 Literaturverzeichnis.....	27

## 1 Einführung

Die Schaltungsfunktion ist nicht so einfach wie es nach den bekannten Schaltplänen [3], [5] und den zusätzlichen Beschreibungen in [4], [6] der von Leon Theremin entworfenen Röhren-Theremin Instrumente von C. Rockmore und L. Rosen den Anschein hat. Daher müssen wir etwas tiefer in die Prinzipien der angewandten historischen Schaltungstechnik, mit all ihren früheren Bauteilmängeln und parasitären Effekten, eintauchen. Schaltung und Eigenschaften des RCA Theremins [2] sind stark abweichend (entworfen von L. Theremin entsprechend RCA Anforderungen), es wird daher hier nicht im Detail diskutiert.

### 1.1 Zusätzliche Erläuterungen

Die hier diskutierten Themen und Fragestellungen basieren auf den verfügbaren Dokumenten der Originalinstrumente von Leon Theremin, deren technischen Untersuchungen sowie eigenen Messungen, die an nachgebauten Originalschaltungen durchgeführt wurden. Schaltungen und Theremin-Versuchsaufbauten wurden unter Verwendung verschiedener elektronischer Teile wie historischen Röhren und modernen

Halbleiterkomponenten entsprechend den Ergebnissen der laufenden Forschungen gebaut, die den Prinzipien, wie sie von Leon Theremin verwendet und erfunden werden, nahe kommen. Schaltungssimulationen wurden durchgeführt, Tests und Messungen einschließlich Audiospektrum-Analysen an den konstruierten Geräten vorgenommen, insbesondere zur Wiedererschaffung des „Rockmore-Instrumentenklangs“.

Auch das bekannte Moog EW-Standard Theremin wurde wegen seines Klang- und Lautstärke-Verhaltens, die sehr zu wünschen übrig lassen, intensiv überprüft und untersucht (Simulationen, Messungen). Das Ergebnis dieses Optimierungsversuchs wird im Kapitel „EW-Standard Theremin-Modifikationen“ auf [www.aetherwellen-musik.de](http://www.aetherwellen-musik.de) ausführlich beschrieben. Die Untersuchungen laufen nun seit mehr als zehn Jahren, mit Rückschlägen und Erfolgen – Ergebnisse sind jetzt dokumentiert auf [www.aetherwellen-musik.de](http://www.aetherwellen-musik.de), auch wenn sie noch nicht vollständig oder perfekt sind.

Derzeit scheint es unmöglich, professionelle Messungen an den Originalinstrumenten durchzuführen, um eine abschließende Bestätigung zu haben, dass die hier vorgestellten Ergebnisse entsprechend den dargestellten Fragestellungen korrekt sind. Solange keine Validierung vorliegt, kann nur der mit den vorgestellten Prinzipien erzeugte Klang im Vergleich zu z.B. den Aufnahmen von Clara Rockmore bewertet werden. Wenn immer möglich wurde versucht, die Ergebnisse mit entsprechender Literatur zu untermauern. Da tiefgehende Fragen hier nicht in angemessener Weise erörtert werden können, ist die verwendete Literatur unten aufgelistet.

Für diejenigen, die sich für die technischen Probleme der Elektronik in den frühen Tagen der Erfindung des Theremins interessieren, sei das Buch „Die Erfindung des Tonfilms“ [64], geschrieben von Dr. h.c. Hans Vogt, einem der Erfinder, empfohlen. Dort wird die weitgehend unbekannte Geschichte der Entwicklung des fotografischen Tonfilms dokumentiert, die von 1919 bis 1925 in Berlin stattfand. Die Erfinder bauten ihre eigenen Röhren, Mikrofone, Lautsprecher, Lampen und Fotozellen. Es gelang ihnen jedoch nicht, den Tonfilm zu vermarkten, so dass ihre Patente in die Schweiz und in die USA gingen. Es dauerte bis 1928, als die neue Errungenschaft des Tonfilms in den USA Aufmerksamkeit erregte – wie das Theremin. Aber nun zu etwas nicht weniger Faszinierendem: dem Theremin Innenleben.

## **2 Rockmore- und Rosen Röhren-Theremin Schaltpläne**

Es wurden zwei Theremin-Schaltpläne erstellt, die die bekannte Schaltung der Rockmore [3], [4] und Rosen [5], [6] Theremin-Instrumente widerspiegeln. Es sind viele Komponentenwerte unbekannt. Die Tonhöhe-Anzeigeschaltung ist bis auf eine vage Beschreibung in „Lucie Rosen's Theremin Notebook“ [6] völlig unbekannt. Die Schaltung wurde rekonstruiert. Basierend auf den verfügbaren Dokumenten wurden plausible Baueilwerte und Korrekturen eingefügt; diese Werte sind von rechteckigen Klammern eingeschlossen.

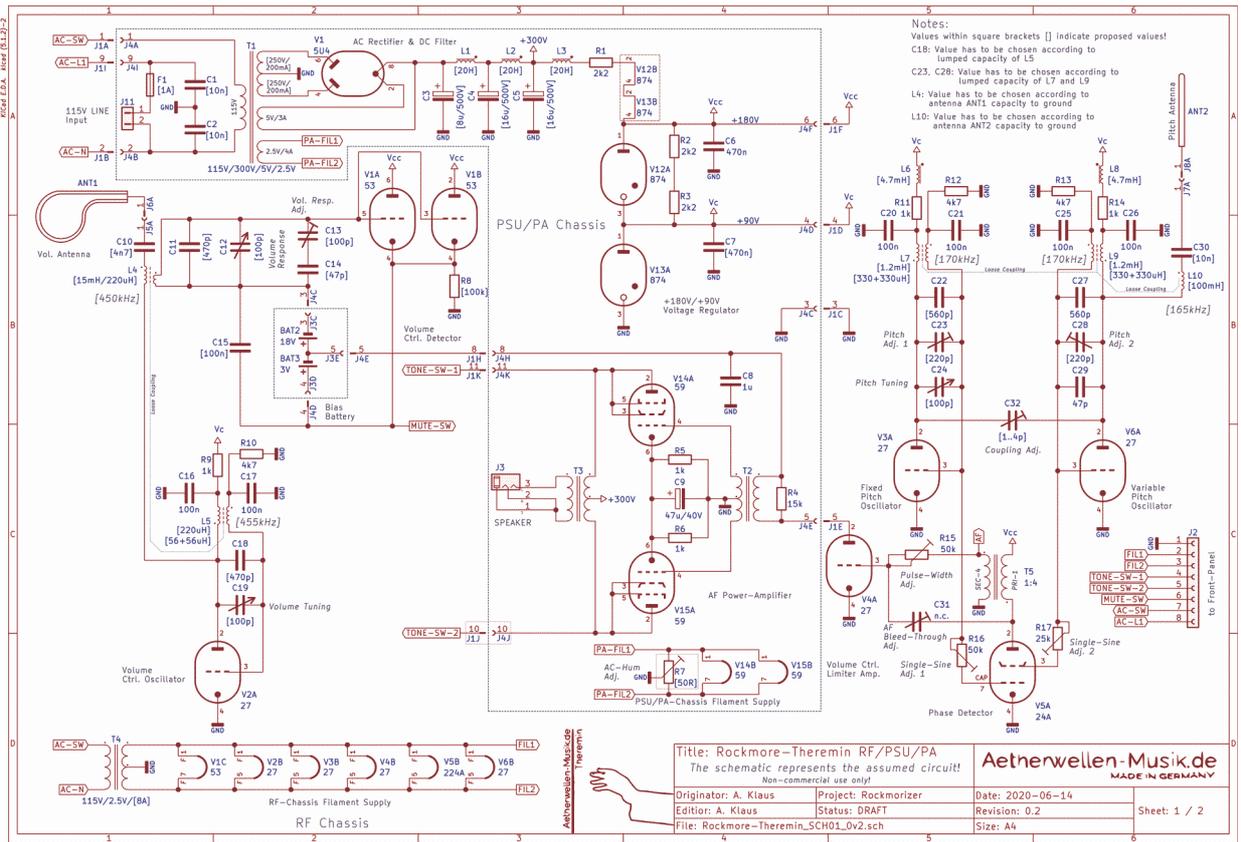


Abbildung 1: Rockmore Röhren-Theremin Schaltplan Version 0.2 Seite 1

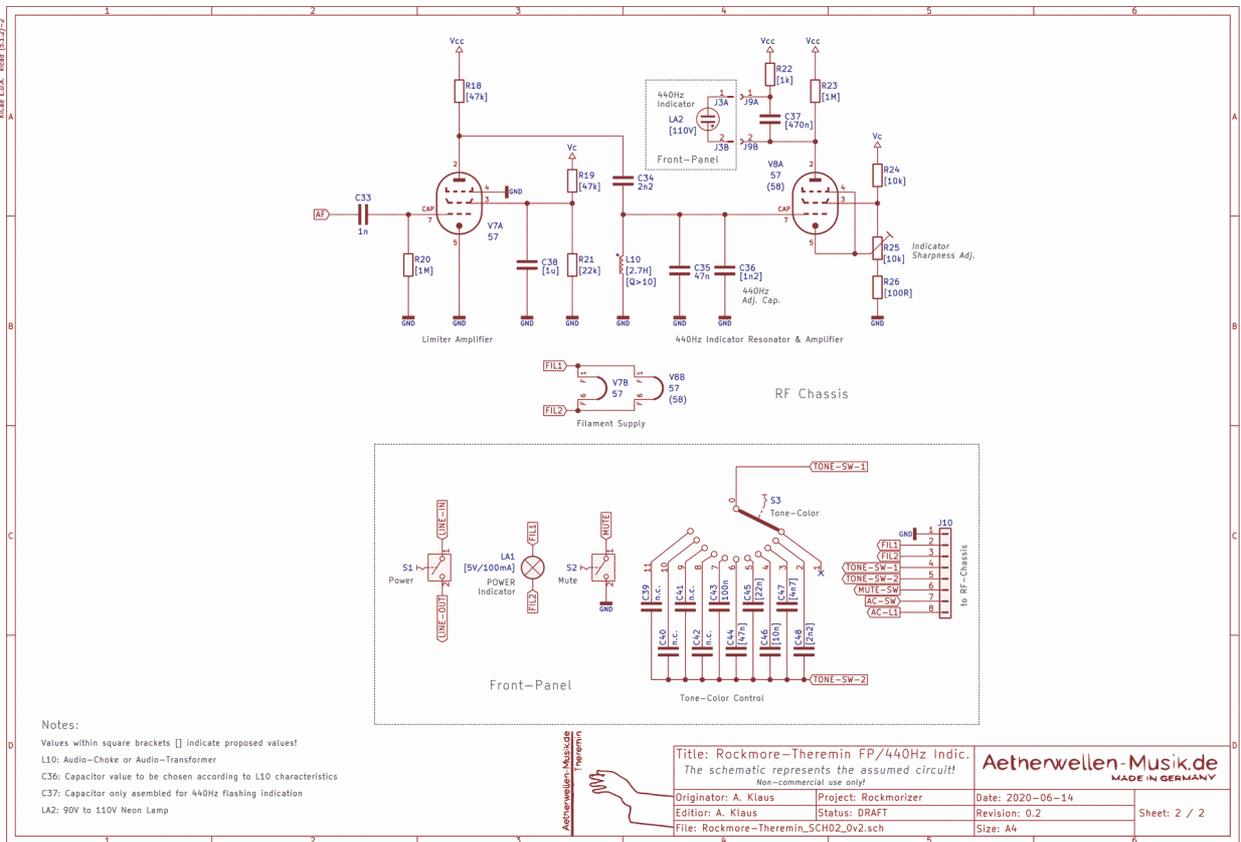


Abbildung 2: Rockmore Röhren-Theremin Schaltplan Version 0.2 Seite 2

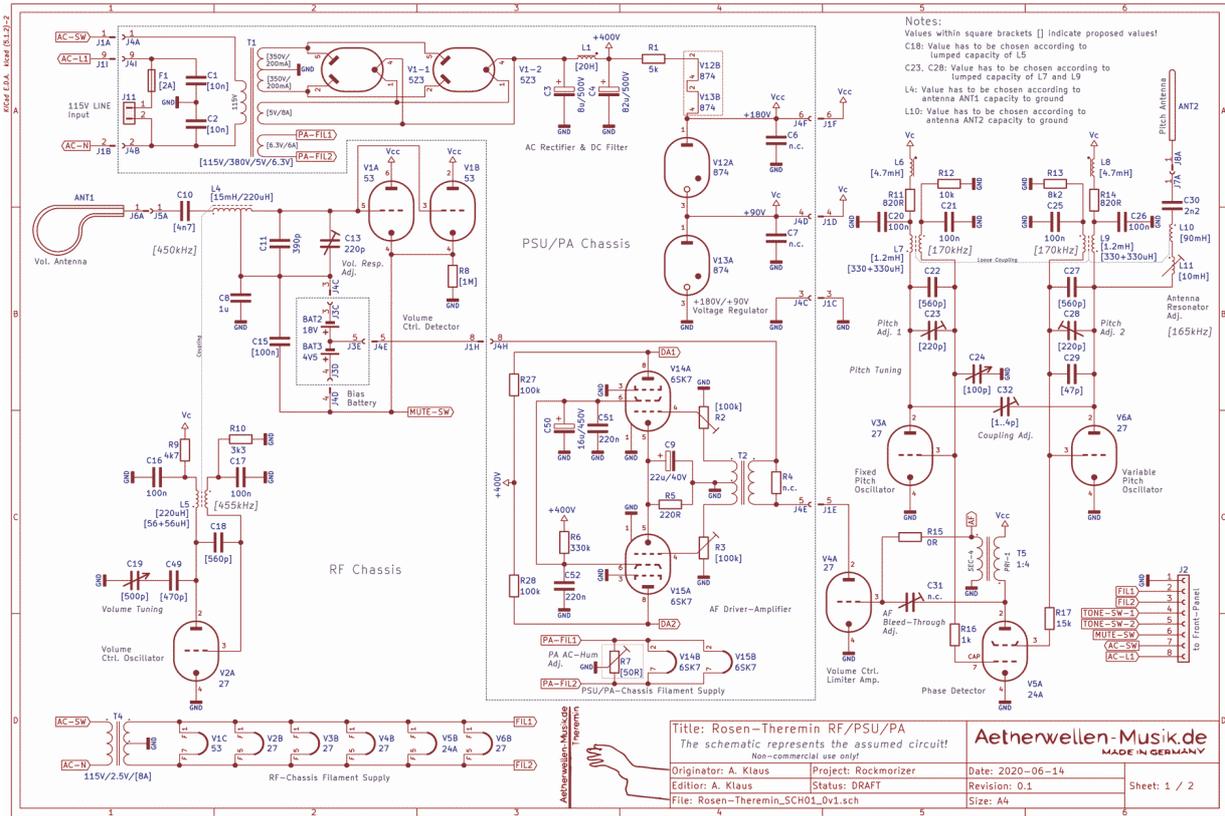


Abbildung 3: Rosen Röhren-Theremin Schaltplan Version 0.2 Seite 1

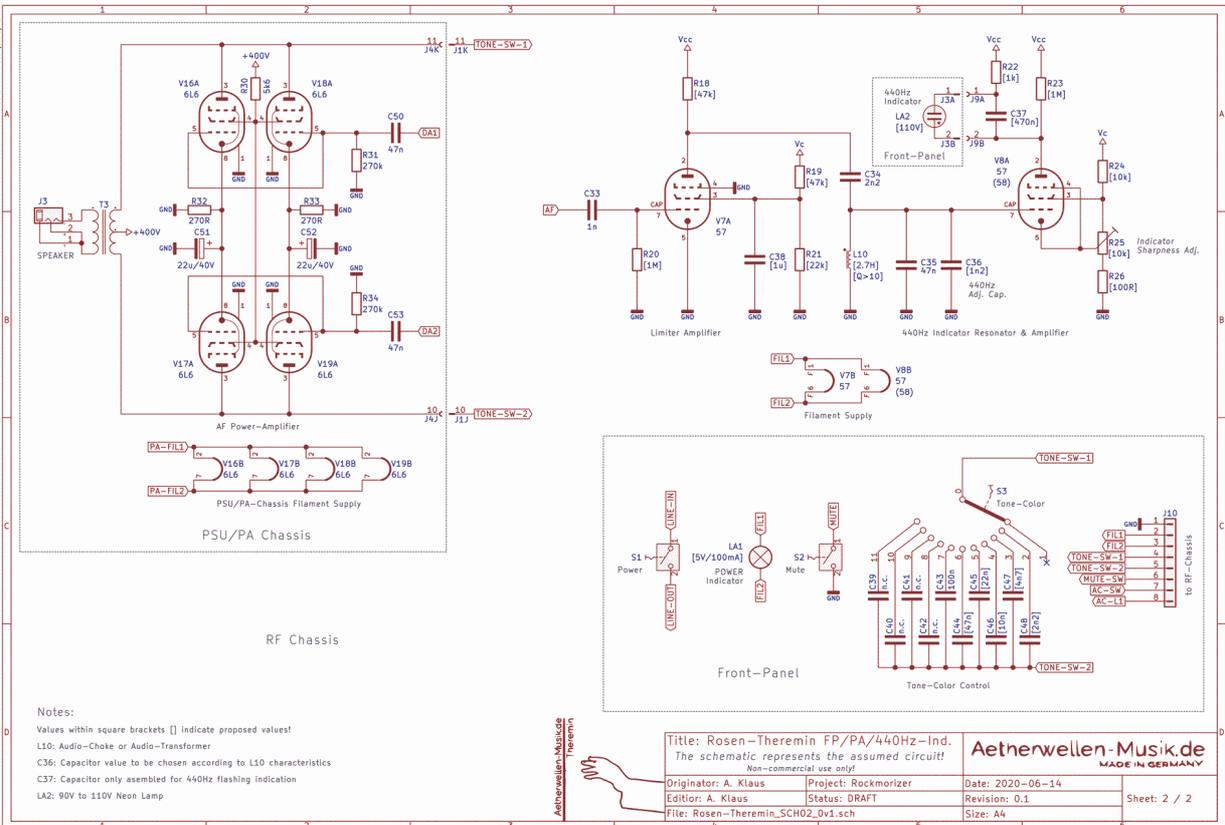


Abbildung 4: Rosen Röhren-Theremin Schaltplan Version 0.2 Seite 2

### 3 Schaltungsfunktion

Als nächstes werden die Funktionsgruppen der Rockmore- und Rosen Theremin-Schaltungen genauer beschrieben.

#### 3.1 Tonhöhen HF-Oszillatoren

Zwei Hochfrequenz- (HF-) Oszillatoren vom Hartley-Typ ([47] Abbildung 9.17 „Dreipunkt-schaltung mit Reihenspeisung“ / [37] Kapitel 21 „Die praktische Ausführung der Armstrong-Schaltung“, Abbildung 25) verwenden Typ 27' Trioden [66] zur Erzeugung von Sinus-Signalen bei etwa 170kHz, deren Frequenzen leicht voneinander abweichen. Die Frequenz eines Oszillators wird durch die variable Impedanz der Tonhöhe-Antenne im Zusammenwirken mit ihrer Verlängerungsspule, beeinflusst. Beide Oszillatoren verwenden HF technisch gesehen (virtuell) mittig angezapfte Parallelresonanzkreise, deren Frequenzen über Drehkondensatoren eingestellt werden können.

Die beiden gekoppelten Teilwicklungen der Oszillatorspule jedes Oszillators sind für HF über Kondensatoren am virtuellen gemeinsamen Mittelpunkt verbunden und geerdet. Jede Oszillator-Röhre erzeugt durch Gitter-Stromfluss eine stabile negative Gleichspannung, die vom HF-Signal überlagert wird. Hierdurch wird eine gleichbleibende sich selbst stabilisierende HF-Amplitude erreicht ([45] Kapitel 12 „Amplitudenbegrenzung durch Gitterstrom“). Die negative Spannung entsteht an Widerstand und Siebkondensator der HF mäßig kalten gitterseitigen Teilwicklung des Oszillator-Schwingkreises.

Das Steuergitter der 27' Röhre des Oszillators wirkt wie eine Diode, deren Anode mit der HF mäßig heißen Wicklungsseite (Gitter der 27' Röhre) verbunden ist und deren Kathode, wie auch die Kathode der Röhre, auf Massepotenzial liegt. Während der positiven Spitzen der erzeugten HF-Spannung leitet diese Diode; somit fließt ein gleichgerichteter HF-Strom (Gitterstrom) durch den erwähnten Widerstand, der eine negative Spannung über der Widerstand/Kondensator-Kombination erzeugt. Steigende negative Spannung führt zu einer geringeren Leitfähigkeit der Röhre und damit zu einer geringeren HF-Amplitude; dadurch sinkt die gleichgerichtete Spannung entsprechend der Zeitkonstante des RC-Gliedes, was wiederum zu einem Anstieg der HF-Spannung führt. Wenn die Zeitkonstante entsprechend gewählt ist, bildet dies ein geschlossenes Regelkreissystem, das die HF-Amplitude weitgehend stabilisiert. Es ist zu beachten, dass die Zeitkonstante des RC-Gliedes nicht zu groß gewählt werden sollte (z.B. durch Erhöhung des Gitterwiderstandes), da dies neben dem beabsichtigten HF-Signal zu unangenehmen (niederfrequenten) Schwingungen führen würde [6] (eine Art Pendelrückkopplung, wie sie in gleichnamigen HF-Empfängern angewendet wird, bei denen die Dämpfung eines HF-LC-Schwingkreises durch periodisches Schalten, um diesen in die Nähe des Oszillierens zu bringen, mit einer zusätzlich erzeugte Frequenz die oberhalb des Hörbereichs liegt, verringert wird).

Die Anode der 27' Röhre ist über die zweite Teilwicklung des Oszillator-Schwingkreises mit der +90V Versorgungsspannung (+80V an der Anode der Röhre) verbunden, die von einer RLC-Schaltung, bestehend aus einem geerdeten Kondensator und einer HF-Drossel mit Vorwiderstand, gefiltert wird (der zusätzliche Widerstand dient zur Reduzierung des Gütefaktors der Drossel, um Eigenschwingungen zu unterdrücken sowie um niederfrequente Entkopplung zu ermöglichen). Wie bereits erwähnt, sind die beiden Teilwicklungen als mittig angezapfte Einzelspule für HF zu sehen, mit einem Kondensator parallel zu den äußeren Spulen-Anschlüssen – also Hartley-Oszillator Konfiguration.

Aufgrund der getrennten Wicklungen liegt am Gitter-Teilschwingkreis des Oszillators die um die gleichgerichtete negative Spannung verschobene HF-Amplitude an, die zur (Phasen-) Detektor-Tetrode 24' geführt wird. Am anodenseitigen Teilschwingkreis der 27' Oszillatortröhre steht die zur Gitterspulenwicklung gegenphasige und um die positive Versorgungsspannung verschobene HF-Spannung zur Speisung des Antennenresonanzkreises (über einen DC Entkopplungskondensator) zur Verfügung.

### **3.1.1 Störeinkopplung**

In den frühen Entwürfen von Leon Theremin war der Antennenkreis mit dem Gitter der Oszillatortröhre verbunden, was den Oszillator empfindlicher gegenüber externen Störungen machte, da diese Signale direkt von der Röhre verstärkt wurden. Eingespeiste HF-Störsignale wirken sich weniger aus, wenn die Anode der Oszillator-Röhre zur Ankopplung der Antennenschaltung verwendet wird. Die verbleibenden Störsignale können durch (Phasen-) Kompensationseffekte, die sich aus der geringen Kopplung zwischen den Spulen beider Oszillatoren ergeben, effektiv reduziert werden. Normalerweise werden die Störungen minimiert, wenn die Spulen entsprechend dem angenehmsten Theremin Klang ausgerichtet sind.

### **3.1.2 Netzbrumm**

Apropos Störungen, es gibt noch ein weiteres Störsignal, das von der Antenne kapazitiv und von allen Spulen des Theremins induktiv aufgenommen wird: das Netzbrummen. Von der Antennenschaltung aufgenommene Netzbrummströme können durch Einfügen eines Hochpassfilters mit ausreichender Grenzfrequenz reduziert werden. Dieses Filter, wie es in Leon Theremins Design verwendet wird, besteht aus dem relativ kleinen DC-Sperrkondensator in der Antennenschaltung, der eine hohe Impedanz für das Netzfrequenzsignal hat, sowie dem Oszillatorschwingkreis selbst in Verbindung mit der angeschlossenen Filterschaltung in der Anodenspannungszuführung der Oszillatortröhre, die eine niedrige Impedanz für 60Hz (USA) bzw. 50Hz (Europa) besitzt. Es ist nicht ratsam, ungeerdete hochohmige Theremin-Schwingkreise direkt an Antennen anzuschließen, da dies unweigerlich zu unangenehmen AM- und FM- Modulationseffekten durch Netzbrumm im Theremin Klang führt.

### **3.1.3 Oszillator-Spulen**

Die Spulen der Tonhöhe-Oszillatoren sind bei den Rockmore/Rosen Theremins [6] im Gegensatz zum RCA-Design, bei dem die Wicklungen jeweils übereinander liegen, nebeneinander auf den rohrförmigen Kern gewickelt [2]. Die Anordnung der nebeneinanderliegenden Spulenteile hat den Vorteil einer geringeren zusätzlichen Kapazität zwischen den beiden Teilwicklungen, was eine höhere Empfindlichkeit des Oszillator-Schwingkreises für Impedanzänderungen des angekoppelten Antennen-Schwingkreises unterstützt; aufgrund des großen mechanischen Abstands der Spule ist die Streuinduktivität aber sehr hoch. Abhängig vom Oszillatorarbeitspunkt und der Röhrencharakteristik können dann zusätzliche HF-Schwingungen in der Größenordnung der Zehnfachen Oszillatorfrequenz aber kleinen Amplituden während der positiven Halbwelle der eigentlichen HF-Schwingung auftreten. Da diese zusätzlichen Schwingungen nur Bruchteile der eigentlichen HF-Amplitude ausmachen, gibt es keine nennenswerten Auswirkungen auf die Theremin-Klangqualität. Es ist auch unwahrscheinlich, dass die zusätzlich erzeugte Frequenz effektiv vom Antennen-schwingkreis abgestrahlt wird, da dieser auf eine viel niedrigere Frequenz abgestimmt ist und daher im höheren Frequenzbereich hohe Verluste aufweist, die dieses Signal stark

dämpfen. Beim Entwerfen eines eigenen Theremin-Instruments wird empfohlen, diese störenden Schwingungen durch eine bifilare Wicklung zu vermeiden, bei der die beiden Drähte der Spule gleichzeitig parallel miteinander gewickelt werden. Dies führt zu einem Kompensationseffekt der Wicklungskapazitäten, da Ströme mit entgegengesetzten Richtungen durch die Drähte fließen. Dieser Effekt kann mit einem Kapazitätsmessgerät nicht direkt gemessen werden; es würde nur die große Kapazität zwischen den beiden eng gewickelten Drähten anzeigen. Natürlich muss die Spannungsfestigkeit des Cu-Lackdrahtes bei bifilarer Wickeltechnik beachtet werden. Aufgrund der engen Kopplung ist die Streuinduktivität nun sehr klein und es ist daher unwahrscheinlich, dass die unerwünschte hochfrequente Teilschwingung auftritt.

### **3.1.4 Kopplungs-Trimmer und Phasenkompensation**

Beide Anoden der Tonhöhenoszillatoren sind durch einen kleinen Trimmerkondensator („Coupling Trimmer“ [3]) verbunden. Dieser Trimmer bildet in Verbindung mit der Oszillator Beschaltung im Gitterkreis, die jeweils mit der 24' Phasendetektorröhre (die Gitter-Kapazitäten zwischen Steuergitter und Schirmgitter aufweist) verbunden ist, eine Art Brückenschaltung. Diese Brücke wird von den gegenphasigen HF-Spannungen am Schwingkreis der Anode und des Gitters gespeist. Durch den Trimmer kann die Brücke auf den gewünschten Grad an Phasenkompensation eingestellt werden, was zu einer optimalen Klangqualität und Tonhöhenverteilung in den unteren Oktaven führt. Die Kompensationsschaltung funktioniert nur dann entsprechend, wenn die Phasenbeziehungen aller Spulen stimmen; d.h. die mechanische Lage zueinander sowie die Polung der Spulenanschlüsse muss richtig sein.

### **3.1.5 Oszillator-Amplitude Regelkreis**

Einer der HF-Oszillatoren ist an den im nächsten Kapitel beschriebenen Antennenresonanzkreis angeschlossen und wird durch diesen mit seiner Impedanz belastet. Wenn die Hand von der Antenne entfernt wird, ist die Belastung maximal, was zu einer minimalen Vorspannung an der Gitter-RC-Kombination des Oszillators und somit zum kleinsten negativen Offset des HF-Signals an der 24' Phasendetektorröhre führt. Außerdem ist die HF-Amplitude in diesem Fall etwas geringer, selbst wenn die zuvor beschriebene Röhrenselbstregelung die Amplitude weitgehend konstant hält. Die Änderung der HF-Amplitude und der negativen Offsetspannung an der 24' Detektorröhre bei Annäherung der Hand an die Antenne verändert hierdurch geringfügig das Puls-Pausen-Verhältnis des erzeugten Audiopulssignals und damit das Klangspektrum (tonhöhenabhängiges Klangspektrum).

### **3.1.6 Tonhöhen-Antenne und zugehörige Verlängerungsspule**

Die Tonhöhen-Antenne ist mit der Anode des zugehörigen HF-Oszillators über die Antennenverlängerungsspule verbunden, um die Oszillator-Frequenz zu beeinflussen, wenn die Hand sich der Antenne annähert. Ohne die Verlängerungsspule würde sich die geringe Kapazitätsänderung der sich nähernden Hand bei den relativ niederohmigen Oszillator-Resonanzkreisen (siehe [47] Abbildung 3.06 „Resonanzwiderstand“), die von Leon Theremin verwendet wurden [2], [3], [5], kaum auswirken. Die Oszillator-Schwingkreise verwenden eine kleine Induktivität und eine große Kapazität (kleines L/C-Verhältnis), um eine optimale Frequenzstabilität zu gewährleisten. Ohne Verlängerungsspule wäre die zusätzliche Handkapazität allein an der Antenne im Verhältnis zum großen Kondensator des Schwingkreises des Oszillators viel zu klein, um einen ausreichenden Einfluss auf die erzeugte Frequenz zu haben.

Es gab bereits in den 1930er Jahren Versuche, die Verlängerungsspule wegzulassen, indem hochohmige Resonanzkreise in Theremin-Oszillatoren verwendet wurden, siehe [7] und [8] „Das Theremin Musikgerät“. Um dies zu erreichen, wurden im Gegensatz zu Schwingkreisen mit niedriger Impedanz eine große Spule und ein kleiner Kondensator verwendet (großes L/C-Verhältnis). In einigen Fällen wurde der Kondensator ganz fortgelassen und die Eigenkapazität der Spule in Verbindung mit der Antennenkapazität zur Verstimmung der Oszillatorfrequenz für eine ausreichend große Empfindlichkeit herangezogen.

Die allgemeine Verwendung von Antennenverlängerungsspulen in der HF-Technik besteht darin, z.B. einen HF-Oszillator an eine mechanisch kurze Antenne anzupassen, die z.B. nicht die Viertelwellenlänge des dafür vorgesehenen HF-Signals (ist für optimalen Antennenstrom und HF-Strahlung notwendig), besitzt. Beim Theremin-Instrument wird aber die Antennenverlängerungsspule verwendet, um den Antenneneinfluss auf die Oszillatorfrequenz zu verstärken, welches in der HF-Technik normalerweise verhindert werden muss. Darüber hinaus wird ein ausreichend linearer Tonhöhenpielbereich erreicht; die Verlängerungsspule wird daher hier oft als Linearisierungsspule bezeichnet.

Beim Theremin liegt die Antennenabstimmung normalerweise unterhalb der Oszillatorfrequenz; die Antenne ist also nicht exakt auf die Oszillatorfrequenz abgestimmt; somit werden nur Bruchteile der verfügbaren HF-Leistung, die vom Oszillator bereitgestellt wird, von der Antenne abgestrahlt. Die Verlängerungsspule bildet zusammen mit der Antennenkapazität (Antennenstab-Kapazität gegen Masse oder der als geerdet zu betrachtenden Hand) einen Reihenschwingkreis mit etwa 170kHz Resonanzfrequenz. Dieser erzeugt einen hohen HF-Antennenstromfluss bei - und auch nahe der Resonanzfrequenz (niedrige Impedanz des Antennenkreises).

Aufgrund der geringen Antennenkapazität gegen Erde (und zu der als geerdet zu betrachtenden Hand) muss die Verlängerungsspule eine hohe Induktivität haben, was zu einem großen L/C-Verhältnis führt [2]. Darüber hinaus muss die Spule auch eine extrem niedrige parasitäre Parallelkapazität (Eigenkapazität) haben, üblicherweise nur Bruchteile eines Picofarad (pF), um die kleine Antennenkapazität nicht zu dominieren, sowie einen ausreichenden Gütefaktor (Q), um die gewünschte Resonanzkurve in Verbindung mit der in Reihe geschalteten Antennenkapazität für die korrekte Tonhöhenlinearisierung zu erreichen. Eine niedrige parasitäre Eigenkapazität entspricht einer hohen Eigenresonanzfrequenz (SFR). Die Spule und ihre Eigenkapazität, die z.B. durch Wicklungen und Verbindungsleitungen verursacht werden, bilden selbst einen Parallelschwingkreis. Um die Schaltungsfunktion nicht zu beeinträchtigen, muss die Eigenresonanz so hoch wie möglich und außerhalb des gewünschten Arbeitsbereichs gehalten werden.

Effekte wie SFR und Berechnungen von Induktivitäten sind recht komplex und umstritten, da verschiedene Theorien angewendet werden können, z.B. kann der Draht der Spule als Leitung angesehen werden; nichtsdestoweniger müssen die parasitären Kapazitäten zwischen den Wicklungen und Anschlüssen der Verlängerungsspulen so gering wie möglich gehalten werden, was bei Leon Theremins Konstruktionen durch die bekannten langen einlagigen Luftspulen mit Spulenkörpern großen Durchmessers und Antenne direkt am oberen Ende erreicht wird. Der große Querschnitt dieser Spulen führt zu einem ausreichend hohen Gütefaktor, der mit dem Durchmesser zunimmt.

Ein großes L/C-Verhältnis bedeutet auch, dass die Spannung an der Antenne stark erhöht wird (viel höher als die Spannung, die der Oszillator an den Antennenkreis liefert) - ein Effekt des großen L/C-Verhältnisses. An den einzelnen Komponenten (C und L) des Serienresonanzkreises treten wesentlich höhere Spannungen auf als an der Serienschaltung insgesamt. Eine hohe Antennenspannung ist vorteilhaft, um ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis (S/N) zu erreichen, vorteilhaft bei Funk- und z.B. Schaltnetzteil-Störsignalen, die ebenfalls die Antenne erreichen. Da der Theremin-Spieler normalerweise Schuhe trägt, während er auf einem nicht leitfähigen Boden steht, ist die Serienimpedanz, die vom Körper des Spielers, den Schuhen und dem Boden gegen Erde gebildet wird, selbst wenn der Skin-Effekt (HF-Strom fließt hauptsächlich an Oberflächen) berücksichtigt wird, hoch (unter Vernachlässigung der kapazitiven Effekte von Hand und Körper auf die geerdete Theremin-Schaltung selbst). Dies bedeutet, dass nur mit einem großen Spannungshub an der Antenne ein ausreichend großer HF-Strom zur HF-Bezugsfläche über all diese Reihenimpedanz-Hindernisse zur Steuerung der Oszillatorfrequenz erreichbar ist.

Der aus Antenne und Verlängerungsspule gebildete Resonanzkreis ist direkt mit dem Parallelresonanzkreis des Oszillators (Anode der 27' Oszillorröhre) über einen DC-Sperrkondensator gekoppelt. Diese beiden gekoppelten Resonanzkreise beeinflussen sich nun in der beabsichtigten Weise, dass eine Verringerung des (induktiven) Antennenstroms die Oszillatorfrequenz senkt. Dies wird nun genauer erklärt:

Wenn die Hand weit von der Antenne entfernt ist, liegt die Antennen-Resonanzkreisfrequenz nahe der Frequenz des Oszillators, aber etwas niedriger [2], [6], wodurch der induktive Antennenstrom und damit der Einfluss des Antennenkreises auf den Oszillator und dessen Frequenz maximal sind. Wenn sich die Hand der Antenne nähert, wird die wirksame Antennenkapazität zu Erde (PE) erhöht, wodurch die Frequenz des Antennenresonanzkreises gesenkt wird. Die Differenz zur Oszillatorfrequenz vergrößert sich, der induktive Antennenstrom nimmt ab und die Oszillatorfrequenz verringert sich ebenfalls, da auch der fließende induktive Antennenstrom im Oszillatorschwingkreis reduziert wird. Dieser Stromfluss durch die anodenseitige Teilwicklung der Oszillatortspule zur HF-Masse wirkt wie eine virtuelle Parallelinduktivität zu einer Hälfte des Parallelresonanzkreises des Oszillators, was praktisch zu einer (scheinbar) kleineren Gesamtinduktivität führt. Wenn sich die Hand sehr nahe an der Antenne befindet, kann der Strom Null werden; ein weiteres Annähern der Hand lässt den Strom wieder ansteigen, jedoch mit kapazitiver Phase. Auch das Berühren der Antenne führt zu einem kapazitiven Stromfluss.

Die aufeinander wirkenden gekoppelten Resonanzkreise (Antenne / Oszillator) bestimmen die resultierende Oszillatorfrequenz. Ähnliche Effekte (Beeinflussung der Oszillatorfrequenz durch einwirken phasenverschobener Ströme auf Resonanzkreise) sind beschrieben in: [48] S. 295 „Die Reaktanzröhre“.

Kurz gesagt: Die mitgezogene Oszillatorfrequenz (höher) wird wieder aus dem Einfluss der dominierenden Antennen-Reihenschwingkreis Frequenz entlassen, wenn sich die Hand der Antenne nähert und der Oszillator so seine eigene Frequenz (niedriger) wieder anzunehmen beginnt, die durch seinen Parallel-Schwingkreis definiert ist. Dies ist beim Theremin-Instrument der Fall, wenn die Oszillatorfrequenz ausreichend höher ist als die Antennen-Schwingkreis Frequenz und der Serienresonanzkreis dann induktiv wirkt.

### 3.1.7 Frequenzsprünge

Wenn beide Frequenzen zu nahe beieinander liegen, tritt ein Frequenzsprung auf die untere Antennenresonanzkreis-Frequenz auf, die die Oszillatorkreis-Resonanzfrequenz dann fast vollständig dominiert [6]. Dieser Effekt wird beschrieben in [38] Kapitel 9-1-G „Die Zieherscheinung“ und in [45] Kapitel 11 „Gleichzeitige Erregung mehrerer Frequenzen, Frequenzsprünge“. Frequenzsprünge müssen für die korrekte Theremin-Funktion verhindert werden. Es ist möglich, dass dieser Sprung im normalen Theremin-Betrieb nicht auftritt, aber wenn das Instrument aus- und wieder eingeschaltet wird (er tritt vorrangig in Verbindung mit einer hohen Tonhöhe Antennenempfindlichkeit auf, wenn die Hand weit von der Antenne entfernt ist). Der Sprung führt im Allgemeinen zu einem sehr hohen Ton. Aus diesem Grund sollte die Empfindlichkeit der Tonhöhen-Antenne nicht zu hoch gewählt werden, d.h. die Frequenz des beeinflussten Oszillators muss unter allen Bedingungen deutlich über der Antennenresonanzkreisfrequenz bleiben.

### 3.1.8 Warum 170kHz ?

Langwellenfrequenzen wurden in den frühen Tagen des AM-Radios verwendet. Langwelle (LW) ist und war nie ein verbreitetes Radioband in den USA, aber in Europa. Diese LW-Funkfrequenz wurde damals freigehalten, da sie als Zwischenfrequenz (ZF) in Radioempfängern diente (ZF: 175kHz [62] S.580, [63] S.107, [77] S.1361), somit gab es dort keine starken Sender, die das Theremin-Instrument hätten stören können.

Die ZF wird in Superhet-Empfängern verwendet, siehe [77] Kap. 26 S.1020 und Kap. 35 S.1228. Gemäß [77] S.1361 waren übliche Zwischenfrequenzen 175kHz, 260kHz, 415...490kHz und 510...525kHz. In Europa wurden üblicherweise Frequenzen um 460kHz, 470kHz und bei den sehr frühen Empfängern 110kHz als ZF verwendet. Das EW-Theremin verwendet Frequenzen um 260kHz (Tonhöhe-Oszillatoren) und 455kHz (Lautstärke-Oszillator).

## 3.2 Tonhöhen-Phasendetektor

Die 24A' Tetroden-Röhre [66] fungiert als Phasendetektor. Dieser detektiert die hörbare Differenzfrequenz der beiden Tonhöhenoszillator-HF-Frequenzen. Die Röhre ist durch den stetigen DC-Offset, der zusätzlich von den beiden Tonhöhenoszillatorschaltungen erzeugt wird, weitgehend negativ vorgespannt und daher meistens gesperrt. Aufgrund der parasitären Kapazität zwischen Steuergitter und Schirmgitter der Tetrode, bildet sich eine Schwebung der beiden mit diesen Gittern verbundenen HF-Signalen aus.

Normalerweise unterscheiden sich die HF-Signale geringfügig in der Frequenz (das Festoszillator-Signal ist um den Betrag der Tonhöhenfrequenz in Bezug auf den variablen Oszillator höher) und der Phasenunterschied der beiden Signale läuft zyklisch durch, solange die Frequenzdifferenz des variablen Oszillators groß genug ist, um nicht auf die Frequenz und Phase des Festoszillators einzurasten. Einrasten der Oszillatoren bedeutet, dass ein Oszillator den anderen synchronisiert, also beide mit gleicher Phase und Frequenz schwingen. Normalerweise wird der Oszillator mit der schwächeren Amplitude durch das stärkere Oszillatorsignal synchronisiert.

Die Phasendetektorwirkung der 24A' Röhre, wie sie hier verwendet wird, darf nicht mit einem multiplikativen oder additiven Mischerröhrenverhalten verwechselt werden, wie es in Superheterodyn-AM-Empfängern verwendet wird.

### **3.2.1 Multiplikative Mischung**

Das multiplikative Mischprinzip basiert auf der tatsächlich weitgehend verzerrungsfreien Multiplikation zweier Signale mit unterschiedlicher Frequenz. Es werden keine (oder zumindest nur wenige) zusätzliche Oberwellen erzeugt. Neben den beiden Eingangsfrequenzen wird deren Summe und Differenz gebildet.

### **3.2.2 Additive Mischung**

Im Gegensatz zu dem (nahezu) oberwellenfreien Verhalten der multiplikativen Mischung liegen am Ausgang einer additiven Misch-Schaltung (z.B. werden zwei HF-Eingangssignale durch Kondensatoren zusammengeführt und führen zu einem nichtlinearen Bauteil wie einer Trioden-Röhre oder auch einer einfachen Diode) beide Eingangsfrequenzen, deren Summe und Differenz sowie viele zusätzliche Oberwellen, z.B. solche, die bei der wiederholten Mischung der Ausgangssignale miteinander entstehen.

### **3.2.3 Phasendetektor mit 24A' Tetroden-Röhre**

Im Prinzip kann die 24A' Schaltung als additiver Mischer angesehen werden; normalerweise wäre dies der Fall, wenn mindestens ein HF-Signal mit niedriger Amplitude angelegt würde. In der Theremin Schaltung werden beide Gitter der Tetroden-Röhre aber mit den zugeführten hohen Oszillator-Hochfrequenzspannungen sowie dem negativen DC-Offset angesteuert. Die Oszillatoren liefern Spannungshübe von bis zu 160V<sub>ss</sub>, die durch die Vorwiderstände an den Detektorröhrengittern durch den auftretenden Gitterstrom etwas reduziert werden. Außerdem wird die Röhre bei den negativen Halbwellen der HF-Signale komplett gesperrt. Aufgrund dieser Schaltungseigenschaften wird vorgeschlagen, die 24A' Tetrodenröhre in Schaltungen von Leon Theremin als Phasendetektor und nicht als (additiven-) Mischer zu bezeichnen. Die Phasenvariation der beiden HF-Signale, die über Serienwiderstände mit dem Steuer- und Schirmgitter der 24A' Tetrode verbunden sind, führt zu einem HF-Pulsstrom (bestehend aus phasenabhängigen Strom-Nadelimpulsen) der durch den ersten Zwischentransformator im Anodenkreis fließt, der ihn integriert.

### **3.2.4 Phasendetektoren mit Röhren für FM-Demodulation**

Das Verhalten der Anordnung mit der Tetroden-Röhre ähnelt dem Prinzip der EQ80 / 6BE7 oder 6BN6 Röhre, die zur Frequenzdemodulation, z.B. in für Frequenzmodulation (FM) bestimmten Empfängern, verwendet wurden ([49] S.163 „EQ80“). Die Röhre leitet nur, solange zwei zugeführte HF-Signale in positiver Richtung an den Steuergittern gleichzeitig (mit gleicher Phasenlage) anliegen, weitgehend unabhängig von der Amplitude der Eingangsspannungen. Der Unterschied besteht darin, dass die 24A' Röhre nicht für eine Phasendetektions- und Begrenzerwirkung ausgelegt ist. Dies führt zu Nadelstromimpulsen mit unterschiedlicher Amplitude entsprechend den phasenabhängigen Momentan-amplituden der beiden HF-Eingangssignale. Außerdem verbleibt während der HF-Puls-Pause ein geringer Rest HF-Strom.

### **3.2.5 Verkopplung der Tonhöhen-Oszillatoren über die Phasendetektor-Röhre**

Das an jedem Detektorröhrengitter der 24A' Röhre vorhandenen Schwebungs-HF-Signal besteht aus der großen HF-Amplitude des zugehörigen Oszillators und einem kleinen phasenveränderlichen Rest-HF-Signal des gegenüberliegenden Oszillators, welches kapazitiv zwischen den Röhrengittern koppelt. Dies führt zu geringen AM-ähnlichen Amplitudenschwankungen (Schwebung), die den großen HF-Oszillatorsignalen überlagert

sind, die an den Phasendetektorgittern anliegen. Im Gegensatz dazu erzeugt die Tonhöhe-Detektorstufe des Moog Etherwave Theremin ein der AM ähnliches Halbwellen-HF-Schwebungssignal hoher Amplitude durch additive Mischung und direkte Demodulation mittels einer Diode.

### 3.2.6 Unterschied von Schwebung und Amplitudenmodulation (AM)

Ein HF-Schwebungssignal kann nicht einfach als AM-moduliertes HF-Signal bezeichnet werden. AM-Modulation bedeutet, dass die Amplitude eines einzelnen HF-Trägers entsprechend einem modulierenden niederfrequenten (NF-) Signal schwankt; im Allgemeinen bedeutet dies Multiplikation und Erzeugung eines neuen Signals, des AM modulierten HF-Trägers, einschließlich der Seitenbänder (also drei resultierende Frequenzen: Träger und zwei Seitenbänder). Die Niederfrequenz ist natürlich nicht direkt im modulierten HF-Signal vorhanden; das NF-Signal kann nur durch Demodulation wiedergewonnen werden. Die Überlagerung von HF-Signalen erfolgt durch lineare Addition von zwei HF-Signalen, wodurch kein neuer AM-modulierter HF-Träger und keine Seitenbänder erzeugt werden (zwei „resultierende“ Frequenzen: beide Ursprungsfrequenzen); es handelt sich also um keine (AM) Modulation, siehe [65] Kapitel 056 „Die Spektren der gebräuchlichen Modulationsverfahren“.

Wie bereits erwähnt, wird in der Mischer-/Detektorstufe des Moog Etherwave Theremin die additive Mischung des HF-Schwebungssignals durch eine (nichtlineare) Diode durchgeführt, die die Misch- und Demodulationsfunktion gleichzeitig durchführt.

Bei der Schaltung von Leon Theremin leitet die Röhre des Phasendetektors 24A' nur wenn beide Gitter aufgrund der stetigen negativen Vorspannung gleichzeitig mit ausreichend hohen positiven HF-Halbwellen angesteuert werden. Somit hat die kleine AM-ähnliche Amplitudenvariation (Schwebung) nur einen geringen Einfluss auf das zu detektierende Audio-Signal. Das an der Sekundärseite des ersten Zwischentransformators messbare Einzel-Sinus NF-Signal wird durch den HF-Burst-Anodenstrom der Detektorröhre durch die Primärwicklung (obere Halbwelle) und den gegenläufigen Induktionseffekt (untere Halbwelle) erzeugt. Dieser Pulsstrom hängt von der Phasengleichheit (Koinzidenz) der HF-Spannungen an den Röhrengittern ab (Phasendetektorwirkung).

### 3.2.7 Wirkung von Phasendetektor und Phasenkompensation

Die HF-Spannungen an den Gittern der Detektorröhre wirken sich wie folgt aus: Wenn wir das Festoszillator-Signal als konstante Phasen- und Frequenzreferenz annehmen und das Signal des variablen Oszillators eine stabile Frequenzdifferenz zum Festoszillator hat, wechselt dessen Phase zyklisch in Bezug auf die Referenzsignalphase mit der Differenzfrequenz beider Oszillatoren. Dies führt zu einem Stromfluss in der Detektorröhre, wenn beide HF-Signale gleich- oder nahezu gleichphasig sind und positive Polarität aufweisen. Außerdem tritt Gitterstrom auf, der die HF-Signale verzerrt und somit Oberwellen erzeugt. Die Höhe des Gitterstroms kann unter anderem durch die in Reihe zu den Detektorröhrengittern geschalteten Widerstände eingestellt werden.

Der Phasenzyklus der beiden Schwebungs-HF-Signale ist normalerweise nicht gleichmäßig sinusförmig. Das Phasenverhalten und damit die entstehende Form der HF-Puls-Strom Einhüllenden hängt von der Kopplung zwischen den beiden Oszillatoren ab. Sie kann durch die Positionierung der Oszillatorspulven zueinander und auch zur Antennenverlängerungsspule beeinflusst werden. Dadurch können die Puls-Breite und die Puls-Pause der HF-Anodenstromfluss-Hüllkurve und somit das Puls-Pausenverhältnis des

detektierten NF-Signals eingestellt werden, um einen angenehmen Klang zu erzeugen; eine Art Pulsweitenmodulation (PWM). Die Hüllkurve des HF-Pulsstroms ist etwa halbsinusförmig.

Der erste Zwischentransformator, der an die Anode der 24A' Röhre und an die hohe stabilisierte Versorgungsspannung (+180V) angeschlossen ist, integriert diesen Anoden-HF-Burst-Strom. Aufgrund der induktiven Integration und den Eigenkapazitäten der Transformatorwicklungen ist das HF-Signal nicht mehr im einzel-sinusförmigen Audio Tonhöhen-Signal der Sekundärseite des Transformators vorhanden.

Aufgrund des durchlaufenen negativen Widerstandsbereichs der Tetrodenröhren-Kennlinie kann an einem bestimmten Arbeitspunkt, der durch die Gitter und Anoden-Spannungen der Röhre bestimmt wird, ein Dynatron ähnliches Verhalten auftreten. Die Schaltung neigt dann zur Resonanz, die hauptsächlich durch die große Sekundärinduktivität des Zwischenstufentransformators und dessen Eigenkapazität, die zusammen einen parallel L/C-Schwingkreis bilden, bestimmt wird. Kontinuierliche (NF-) Oszillation wird normalerweise durch die vorhandene Dämpfung, bedingt durch den niedrigen Gütefaktor des Audio-Zwischentransformators selbst, sowie den im folgenden Audio-Begrenzerverstärker mit 27' Röhre auftretenden Gitterstrom, unterbunden. Der Gitterstrom der Begrenzerverstärker-Röhre tritt nur bei der positiven Einzelsinus-Audiohalbwelle auf.

### **3.3 Audiosignal Begrenzerverstärker**

Das Steuergitter der 27' Triode-Röhre, die als Audio-Begrenzer- und spannungsgesteuerter Verstärker verwendet wird, ist mit der Sekundärseite des ersten Zwischenstufen-Transformators über einen Widerstand verbunden. Dieser bestimmt die Dämpfung des als L/C-Parallelresonator wirkenden Transformators bei Gitterstromfluss und somit die Amplitude der positiven Halbwelle. Gitter und Kathode der Röhre bilden eine Diode, die bei positiver Spannung leitet. Daher tritt die Dämpfung nur bei der positiven Halbwelle auf, was dazu führt, dass die positive Halbwelle des Einzel-Sinus ähnlichen Audioimpulses teilweise beschnitten wird. Die Höhe der Anodenspannung der 27' Audioröhre bestimmt deren Verstärkung und Begrenzerwirkung. Zusätzlich wird das Puls-Pausen-Verhältnis des erzeugten Audio-Pulssignals und damit das Klangspektrum geringfügig beeinflusst (lautstärkeabhängiges Klangspektrum).

Die Schaltung wirkt als nichtlinearer spannungsgesteuerter Verstärker und Begrenzer, der ein Audiosignal erzeugt, das aus positiv und negativ gerichteten, fast rechteckig geformten Pulsen mit unsymmetrischer Dauer und Amplitude besteht; dem begrenzten Einzelsinus-Signal (Abbildung 5. Kurve 1). Der obere (positive) Teil des Einzel-Sinus Pulses bewirkt, dass die 27' Röhre Gitterstrom zieht und daher vollständig übersteuert wird (hohen Anodenstrom). Das sich ergebende Signal an der Anode der Röhre ist daher hauptsächlich rechteckig mit Verrundungen im unteren Teil. Die größere negative Halbwelle bewirkt, dass die Röhre sperrt; dies ergibt die schnell ansteigenden und abfallenden Flanken des oberen rechteckigen Teilimpulses (Abbildung 5. Kurve 2).



Abbildung 5: Einzel-Sinus (1) und begrenztes Einzel-Sinus (2) Signal

### 3.3.1 Lautstärkeabhängiges Klangspektrum

Es ist wichtig, dass die Form des Audiosignals (zumindest seine Pulsbreite) leicht von der Lautstärke abhängt. Die Pulslänge und das Amplitudenverhältnis jeder Rechteckhalbwelle im Verhältnis zur Puls-Pausen-Dauer (das resultierende Puls-Pausen-Verhältnis) bestimmt maßgeblich das Klangspektrum und damit den Klangeindruck des Theremin-Instruments.

## 3.4 Lautstärke Detektor

Die Lautstärke-Detektorschaltung nutzt eine 53' Doppeltriode [66]. Diese beiden Trioden sind parallel geschaltet, um eine höhere Steilheit (Verstärkung) als mit einer einzelnen Triode allein zu erreichen. Dies ist vorteilhaft, um einen starken Anstieg und Abfall der Steuerspannung des Begrenzerverstärkers für z.B. Stakkato-Spiel zu erzielen. Die Anoden sind an die hohe stabilisierte positive Versorgungsspannung (+180V) angeschlossen. Die Gitter sind mit einem einstellbaren Parallel-L/C-Schwingkreis verbunden, dem Lautstärke-Detektor-Resonanzkreis. Die Resonanzfrequenz und damit der Lautstärkeverlauf kann über den Haupt-Drehkondensator (bezeichnet als „Vol. Tuning“ in [3]), der vermutlich über das Holzrad (nur beim Rockmore Theremin Instrument), das etwas unterhalb der Lautstärke-Antenne sitzt, einstellbar ist und durch einen zusätzlichen parallel geschalteten Trimmerkondensator, beeinflusst werden.

### 3.4.1 Detektor-Schwingkreiskopplung an die Verlängerungsspule

Um die Kopplung des Detektor-Resonanzkreises an die Lautstärke-Antennenverlängerungsspule einstellen zu können, sitzt dessen Spule auf einem runden Spulenkörper, der über die große Verlängerungsspule geschoben wird. Dieser kann vom kalten Ende, das mit dem Oszillator verbunden ist, in die Mitte der Verlängerungsspule verschoben werden. Die Kopplung vergrößert sich, wenn die Lautstärke-Detektor Resonanzkreis-Spule näher an die Mitte der Verlängerungs-Spule rückt und die detektierte Lautstärke-Steuerspannungsamplitude steigt dann an; gleichzeitig aber nimmt die Bandbreite zu und reduziert die Empfindlichkeit der Lautstärkesteuerung. Wird die Detektorkreis-Spule näher an das Ende der Verlängerungsspule verschoben (geringere

Kopplung), führt dies zu einem etwas geringeren Resonanzspannungshub am Schwingkreis des Detektors, bewirkt jedoch gleichzeitig eine kleinere Bandbreite, was zu einer höheren Lautstärke-Ansprechempfindlichkeit führt.

### **3.4.2 Dynamische Lautstärkesteuerung (Über-/Unterschwingen)**

Zu beachten ist, dass die für das Stakkato-Spiel wesentliche „Attack“-Reaktion durch die Resonanzkreisbandbreite des Detektors bestimmt wird. Der LC-Schwingkreis neigt dazu, entsprechend seiner Bandbreite zu „klingeln“; er erzeugt Über- und Unterschwingen in der Hüllkurve der zu detektierenden HF-Spannung bei schnell variierenden Frequenzänderungen, die durch schnelle Handbewegungen in der Nähe der Lautstärke-Antenne verursacht werden. Das Über- und Unterschwingen führt zu steil ansteigender und abfallender Lautstärke-Steuerspannung, selbst wenn die Detektorbandbreite recht klein ist; eine gewisse geringe Lautstärke-Ansprechverzögerung kommt noch hinzu. Für den scharfen Abfall (Decay) oder Anstieg (Attack) der Lautstärke, muss die Hand schnell in der Nähe der Antenne zeitlich bereits schon etwas vor dem Einsetzen des Lautstärke-sprungs bewegt werden; ein Theremin-Spieler gewöhnt sich ziemlich schnell daran. Langsame Bewegungen der Hand des Spielers erzeugen keine zusätzlichen Attack- oder Decay-Effekte; die Lautstärke steigt und verringert sich dann entsprechend den Handbewegungen.

### **3.4.3 Detektor Gittervorspannungs-Batterie**

Die Detektorschaltung entspricht dem Kathoden-Detektor Typ. Ohne - oder mit nur geringem HF-Signal am Parallelresonanzkreis (Lautstärke-Oszillatorfrequenz niedriger als die Resonanzfrequenz des Detektor-Kreises, wenn die Hand nahe der Antenne ist), wird die Röhren-Gittervorspannung vollständig von der negativen Spannung der „Gittervorspannungsbatterie des Detektors“ bestimmt, die von der Kathode der 53' Röhre über den Schwingkreis mit dem Steuergitter verbunden ist und die Röhre vollständig sperrt. Somit fällt über dem großen Widerstand, der von der Kathode mit Masse verbunden ist, keine Steuerspannung ab.

### **3.4.4 Stummschaltung**

Der Schalter zur Stummschaltung ist dem Kathodenwiderstand der Detektorröhre parallelgeschaltet, um die erzeugte positive Lautstärke-Steuerspannung vollständig gegen Masse kurzzuschließen (wird die Hand bei geschlossenem Schalter von der Lautstärke-Antenne entfernt, muss somit die volle Anodenleistung von der Detektorröhre abgeführt werden, da diese dann leitet).

### **3.4.5 Erzeugung der Lautstärke-Steuerspannung**

Beim Entfernen der Hand von der Lautstärke-Antenne steigt die Oszillatorfrequenz und damit auch die HF-Amplitude des Detektor-Resonanzkreises entsprechend seiner Resonanzkurve an. Die entstehende HF-Spannung führt dazu, dass die 53' Röhre entsprechend ihrer parallelgeschalteten Triodencharakteristik leitet, wenn die HF-Amplitude über die von der Gittervorspannungsbatterie definierte Spannungsgrenze ansteigt. Dies erzeugt die positive Lautstärke-Steuerspannung am Kathodenwiderstand der Detektorröhre, die dann als Anodenspannung der Begrenzerverstärkerstufe dient. Gemäß [5] und [6], ist ein zusätzlicher Kondensator parallel zum Kathodenwiderstand geschaltet, der neben der Unterdrückung von Rest-HF eine zusätzliche Zeitkonstante bewirkt um „Klopfeffekte“ bei zu schnellen Handbewegungen zu reduzieren. Eine zusätzliche Batterie ist in Reihe mit der Kathode der Detektorröhre (an der die positive

Lautstärkeregelspannung liegt) und dem zweiten Zwischentransformator der Lautstärkeregelungsbegrenzer-Verstärkerschaltung geschaltet. Wenn an der Kathode der Detektorröhre keine - oder nur eine sehr geringe positive detektierte Spannung anliegt, wird dieser Begrenzerverstärker gesperrt.

### **3.4.6 Lautstärke Stummschaltungs-Batterie**

Die „Lautstärke Stummschaltungs-Batterie“ liefert eine negative Spannung, die der Anode der 27' Begrenzer-Verstärkerröhre zugeführt wird, solange keine (positive) Steuerungspannung vom Detektor erzeugt wird. Die Kathode der Röhre ist geerdet und das Gitter wird durch den großen positiven und negativen Spannungshub des Einzel-Sinus-Audiosignals angesteuert. Elektronen, die die Kathode verlassen, werden durch die positiven Halbwellen des Audiosignals am Gitter in Richtung Anode beschleunigt. Selbst wenn die Anode der Röhre auf Massepotenzial liegt, ist am angeschlossenen zweiten Zwischentransformator ein Restaudiosignal vorhanden, das vom übersteuerten Gitter austritt; Restelextronen erreichen also die Anode, verursacht z.B. durch Zwischenelektroden-Kapazitäten und Kriechströme. Diese Effekte werden bei negativer Spannung an der Anode stark reduziert, da die von Steuergitter beschleunigten Elektronen gezwungen werden, zu diesem zurückzukehren, wodurch die Anode der Röhre nicht mehr von ihnen beeinflusst wird. Das Instrument ist daher ausreichend leise wenn es stummgeschaltet ist. Voraussetzung ist natürlich die richtige Beschaltung der Begrenzer-Verstärkerstufe; Audiosignalkopplungen über mechanisch parallel angeordnete Leitungen und Komponenten sind zu vermeiden (evtl. ist zusätzliche Abschirmung erforderlich).

### **3.4.7 Unerwünschte „Geister-Töne“**

HF-Einkopplung in die Audiostufen muss unterbunden werden, da z.B. Rest-HF der Tonhöhenoszillatoren von den Auditoröhren demoduliert werden können, was zu unerwünschten „Geister-Tönen“ führt, auch wenn das Instrument stummgeschaltet ist. Gleiches gilt für die ordnungsgemäße Entkopplung aller Versorgungsspannungen und Erdung.

### **3.5 Lautstärke-Oszillator**

Die Schaltung des Lautstärke-Oszillators ist außer den für den Betrieb um 455 kHz optimierten Komponentenwerten identisch mit der der Tonhöhenoszillatoren.

### **3.6 Lautstärke-Antenne und Verlängerungsspule**

Die Schaltung der Lautstärke-Antennen-Erweiterungsspule ist außer den für den Betrieb um 455 kHz optimierten Komponentenwerten identisch mit der der Tonhöhe-Erweiterungsspule.

### **3.7 Warum 455kHz ?**

Diese Frequenz stellt die übliche Zwischenfrequenz dar, die in AM-Empfängern verwendet wird ([63] S.107). Sie liegt außerhalb des Radio- (AM-) Bandes; somit gibt es hier keine leistungsstarken Sender, die das Theremin-Instrument stören könnten.

### **3.8 NF-Leistungsverstärker**

Der NF-Leistungsverstärker des Rockmore-Instruments nutzt zwei 59' Röhren [66] in Trioden-Gegentakt-Konfiguration mit bis zu 15W Audioleistung. In der Rosen-Endstufe kommen zwei 6SK7 Pentoden-Röhren in der Treiberstufe und vier (!) 6L6 Beam-Power

Tetroden-Röhren in Gegentakt-Anordnung zum Einsatz, die bis zu 100W (!) Audioleistung bereitstellen.

### **3.8.1 Rockmore-Theremin Endstufe**

Beim Rockmore-Verstärker ist die Anode des spannungsgesteuerten Begrenzerverstärkers 27' mit der Steuerspannung (53' Röhrenkathode) über die Primärseite des zweiten Zwischentransformators verbunden. Parallel zu dieser Wicklung ist ein Dämpfungswiderstand eingefügt, um die Frequenzkurve des Transformators abzuflachen und Über-/Unterschwingen zu reduzieren. Jede der beiden Primär-Wicklungen ist von der Mittelanzapfung aus direkt mit dem jeweils zugehörigen Steuergitter der 59'-Röhren verbunden. Die Röhren werden von den Audiosignalen gegenphasig angesteuert, die vom Zwischenstufentransformator geliefert werden.

Die Mittelanzapfung ist mit Masse verbunden, während die Kathoden der Röhren zusammen über eine RC-Kombination an Masse gelegt sind. Der Wert des zugehörigen Widerstands ist so gewählt, dass er eine ausreichende Vorspannung für die Röhren erzeugt, während die Kathoden-Ströme beider Röhren durch ihn fließen (automatische Gittervorspannungserzeugung). Der zugehörige Elektrolytkondensator hat einen ausreichend hohen Wert um eine angemessene Verstärkung der unteren Frequenzen zu gewährleisten. Die Anoden der Röhren sind mit den zugehörigen Teil-Wicklungen der mittig angezapften Primärwicklung des NF-Ausgangstransformators verbunden [26]. Die Mittelanzapfung wird von der höchsten gefilterten Netzteilspannung (+300V) gespeist.

### **3.8.2 Tiefpass-Filter**

Durch einen Stufenschalter können verschiedene Kondensatoren zwischen die äußeren Anschlüsse der mittig angezapften Primärwicklung gelegt werden. Diese Schaltung dient als Tiefpassfilter. Die mittig angezapfte Wicklung mit Parallelkondensator stellt einen gedämpften Parallelresonanzkreis dar. Aufgrund der großen Induktivität der Wicklung sind kleine Kondensatorwerte geeignet, um das gesamte zu filternde Audiospektrum abzudecken. Aufgrund der geringen Güte des Ausgangsübertragers, der Impedanz der Röhren sowie des angeschlossenen Lautsprechers, wird dieser Parallelschwingkreis stark gedämpft, so dass die Tiefpass-Wirkung überwiegt.

Der Parallelschwingkreis ähnelt den auch mit Mittelabgriff versehenen (Hartley-) Tonhöhen- und Lautstärke-Oszillator Schwingkreisen. Würde eine geringe (kapazitive) Kopplung von den Anoden zu den „gegenüberliegenden“ Röhrengittern vorgesehen, könnte die Dämpfung reduziert und ein Formant-Filtereffekt bewirkt werden. Wenn die Kopplung zu stark erhöht wird ergibt sich die Funktion eines Gegentakt-Oszillators. Die Dämpfung könnte auch durch eine kapazitiven Kopplung zwischen den Anoden jeder Röhre und ihrem Gitter reduziert werden, wodurch eine Art Huth-Kuehn (Miller-) Schaltung in Verbindung mit dem mittig angezapften Eingangszwischenstufentransformator mit zugehörigen parasitären Parallelkondensatoren (lose gekoppelte Schwingkreise am Eingang und Ausgang der Endstufenröhren) entsteht.

### **3.8.3 Rosen-Theremin Endstufe**

Der Verstärker des Rosen Theremin Instruments ist bis auf die Tetroden-Röhren in der Endstufe und zusätzlicher Vorverstärkung durch Pentoden in der Treiberstufe recht ähnlich. Die Audio-Ausgangsleistung ist natürlich viel höher, was z.B. zu einem größeren Ausgangstransformator und geänderten Gittervorspannungs- und Schirmgitter-

Versorgungsschaltungen führt. Darüber hinaus sind die Amplituden der phaseninvertierten Eingangssignale einstellbar, um gleiche Pegel an den Primärwicklungen des Ausgangstransformators zu gewährleisten und leicht variierende Röhreneigenschaften auszugleichen (geringer Verzerrungen).

### **3.8.4 Zusammenwirken von Endstufe und Lautsprecher**

Beide Verstärker verwenden keine Gegenkopplung. Das bedeutet, dass die volle Verstärkung der Röhren zum Betrieb des Lautsprechers ausgenutzt wird; es gibt also keine Verringerung der Verzerrungen, dies ist aufgrund des realisierten Ausgangsübertrager-Tiefpass-Filters auch nicht möglich.

Der Innenwiderstand der Verstärker ist auch recht hoch, so dass der Lautsprecher nur geringfügig gedämpft wird [25]. Dies führt zu starkem Über- und Unterschwingen bzw. Nachschwingen des Lautsprechers selbst, also Formantfärbung des Klangs. In heutigen Verstärkern mit normalerweise niedrigem Ausgangswiderstand, wird der Lautsprecher stark gedämpft, wodurch die Auswirkungen der vom Lautsprecher selbst verursachten Klangfärbung stark reduziert werden.

## **3.9 Lautsprecher**

Der Lautsprecher ist ein wesentlicher Bestandteil des Theremins, der nicht von dem Instrument getrennt werden kann, für das er entwickelt wurde. Er kann dem Klang zusätzliche Effekte verleihen, abhängig von der Konstruktion der Schallwand, des Gehäuses und natürlich des Lautsprecherchassis selbst [25], [27], [33]. Tatsächlich wirkt der Lautsprecher, neben seinen allgemeinen Hoch- und Tiefpasseigenschaften, als Allpass-Filter, welches eine Verzögerung (Phasenverschiebung) für bestimmte Frequenzen erzeugt [24]. Darüber hinaus erzeugt der Lautsprecher Intermodulationseffekte, die als Amplituden-Modulations-Verzerrung (AMD) und Frequenz-Modulations-Verzerrung (FMD) bezeichnet werden und so den Klang färben [23].

### **3.10 Tonhöhen-Anzeige (440Hz)**

Die Tonhöhen-Indikatorschaltung ist nicht durch einen Schaltplan dokumentiert, es existiert nur eine vage Beschreibung [6]. Die Schaltungsfunktion wird wie folgt vermutet: das detektierte Signal an der Anode der 24' Phasendetektor-Röhre wird durch eine 57' Pentode [66] in der ersten Stufe, die als Begrenzer wirkt, verstärkt. Die Schirmgitterspannung dieser Röhre ist daher durch den entsprechenden Vorwiderstand bzw. Spannungsteiler sehr niedrig eingestellt, der recht große Anodenwiderstand ist an der positiven Spannungsversorgung (+180V) angeschlossen.

#### **3.10.1 Verstärker und 440Hz Resonator**

Das Steuergitter ist über einen kleinen Kondensator lose mit der 24' Anode gekoppelt und über einen großen Widerstand mit Masse verbunden. Die zweite Indikatorstufe verwendet eine weitere 57' oder 58' [66] Pentode. Deren Anode ist über einen großen Widerstand parallel zu einer Neonlampe, die zur Anzeige dient, an die positive Versorgungsspannung (+180V) angeschlossen. Das Steuergitter ist mit einer NF-Drossel mit einstellbarem Parallelkondensator verbunden, die einen Parallelschwingkreis bilden. Die Kathode der Röhre ist mit einem Spannungsteiler verbunden, der eine ausreichend hohe Spannung liefert, um die Röhre fast vollständig zu sperren, wenn nur noch ein geringes Audiosignal vorhanden ist, während das Gitter über die NF-Resonator-drossel geerdet ist. Der Gitterschwingkreis ist lose mit der Anode der ersten Verstärkerröhre gekoppelt, um die

Dämpfung zu minimieren, was zu einem hohen Spannungshub führt. Die Resonanzfrequenz des L/C-Kreises liegt bei 440Hz, einstellbar über den Parallelkondensator oder durch Änderung der Induktivität der Audio-Drossel. Der Wert der Drossel kann ggf. durch Einstellen des Andrucks des Eisenkerns (Luftspaltabstand) an einer dafür vorgesehenen Schraube verändert werden. Die Schärfe der Anzeige ist abhängig vom Wert des Koppelkondensators am Gitter; dessen Vergrößerung erhöht die Dämpfung (bewirkt durch die erste Verstärkerstufe) und verbreitert damit die Resonanzkurve.

### **3.10.2 Neon-Anzeige**

Bei Erreichen der Zündspannung der Neonlampe leuchtet diese auf. Dies geschieht, wenn der Anodenstrom der Röhre und damit die verstärkte 440Hz Spannungsamplitude am Neon-Indikator ansteigt, weil der 440Hz Resonanzspannungshub des Schwingkreises, der am Gitter liegt, die negative Vorspannung der Röhre übersteigt und ihren Arbeitspunkt in den Bereich höherer Verstärkung verschiebt. Der von einer Neonlampe benötigte Strom ist normalerweise sehr gering (ca. 200uA), während die Zündspannung ziemlich hoch ist (in der Größenordnung von 100V). Nach dem Zünden beträgt die Lampenspannung typischerweise 90V (Brennspannung). Die 440Hz („A“) Anzeige kann durch den Spannungsteiler, der das Kathodenpotenzial der Röhre erzeugt, feinabgeglichen werden.

### **3.11 Bedienelemente auf der Frontplatte**

Auf der Frontplatte befinden sich der Netzschalter, die Einschalt-Anzeige-Lampe, der Stumm-Schalter, der elfstufige Klangfarbenschalter (mit angelöteten Kondensatoren) und die Neonlampe zur 440Hz Tonhöhenanzeige. Die beiden Drehknöpfe zur Einstellung der Lautstärke (Lautstärke-Oszillator-Frequenz) und der Tonhöhe (Tonhöhe-Oszillator-Frequenz) sind ebenfalls auf der Frontplatte zugänglich; die zugehörigen Drehkondensatoren sind aber dahinter auf der Montageplatte, die die weiteren Schaltungskomponenten und Röhren trägt, montiert. Sie sind über lange Achsen von der Frontplatte aus zugänglich.

### **3.12 Netzteil**

#### **3.12.1 Anodenspannungen**

Das Netzteil liefert die Anodenspannung von ca. +300V für die Audio-Endstufe und stabilisierte Spannungen (durch 2x 874 Röhren [66]) von +180V und +90V.

#### **3.12.2 Röhrenheizung**

Beim Rockmore-Instrument werden die Wechselspannungen zur Röhrenheizung von 2,5V für die 59' Radiotron-Röhren der Endstufe und 5V für die Gleichrichterröhre 5U4 vom Haupt-Netztransformator geliefert. Die Wechselspannung zur Heizung der restlichen Radiotron-Röhren mit 2,5V wird von einem separaten Netztransformator geliefert.

Beim Rosen-Instrument wird die 2,5V Wechselspannung zur Heizung der Radiotron-Röhren von einem separaten Netztrafo und die 5V für die Heizung der Gleichrichterröhre 5Z3 sowie die 6V Heizspannung für die Röhren 6SK7 und 6L6 vom Hauptnetztrafo geliefert.

### 3.12.3 Netzschalter und Netz-Entstörung

Der einpolige Netzschalter ist bei beiden Instrumenten in Reihe zu den Transformatoren geschaltet, ihre Primärwicklungen sind parallel geschaltet. In den Schaltplänen ist keine Netzsicherung dokumentiert [3], [5]. Das Chassis ist mit der Netz-Erde (Schutzerde - PE) verbunden, zwei HF-Entstörkondensatoren sind von jedem der Netzleitungsadern aus mit PE verbunden.

## 4 Röhren

Die Elektronenröhren (z.B. Typ Radiotron von RCA [66]) der 1920er Jahre haben viele Mängel wie geringe Verstärkung und nichtlineare Kennlinien. Diese Unvollkommenheiten werden in der von Leon Theremin definierten Schaltung sinnreich ausgenutzt.

### 4.1 Verstärkungsfaktor der Röhren

Die Steilheit ( $\mu$ ) der 27' Triode (RCA UY-227) beträgt typischerweise  $0,82\text{mA/V @ }90\text{V}$  und der Verstärkungsfaktor 9, eine "moderne" ECC82/12AU7 Triode (die eine der niedrigsten Steilheiten und Verstärkungsfaktoren derzeitiger Röhren besitzt) hat  $3,1\text{mA/V @ }100\text{V}$  und einen Verstärkungsfaktor von 19,5.

### 4.2 Regel-Röhren

Speziell für TV-Empfänger-Tuner und ZF-Verstärker wurden Röhren mit variabler Steilheit (Regelröhren) entwickelt, die hauptsächlich für HF- Anwendungen mit automatischer Verstärkungsregelung (AGC) gedacht waren. Dies erfolgte durch Variation der (negativen) Gitterspannung der Trioden-Röhren (z.B. PCC189/7ES8  $0,9\text{mA/V @ }U_{g1} -4\text{V}$ ) oder der Schirmgitterspannung (G2) von Pentoden-Röhren wie der EF183/6EH7.

### 4.3 Konfiguration der Pentode als Tetrode oder Triode

Pentoden-Röhren mit zugänglichem Bremsgitter (G3) können zu einer Triode oder auch Tetrode verschaltet werden. Dies ist in Theremin-Anwendungen sehr nützlich. Natürlich gibt es viele andere Regelröhren mit variabler Steilheit; der Vorteil von ihnen ist, dass sie billig und leicht verfügbar und in Theremin-Anwendungen durchaus verwendbar sind. Der Grund, warum sie billig sind, ist natürlich ihre Nichtlinearität, die zu Verzerrungen führt und sie für den Einsatz in Standard-Audioverstärkern, der heute üblichen Verwendung für Röhren, disqualifiziert, so dass sie fast niemand verwendet.

### 4.4 Verwendung von Röhren in Theremin-Schaltungen

Abgesehen von der Audio-Endstufe ist das Theremin weitgehend nicht auf Röhren mit linearer Charakteristik angewiesen; die Oszillatoren, der Phasendetektor, der Begrenzerverstärker und sogar der Lautstärke-Detektor führen eine Art von Schaltvorgang oder nichtlinearer Verstärkung durch. Daher werden diese Röhrentypen (Regelröhren) ausgiebig in den Theremin-Schaltungen des Autors verwendet. Röhrendaten sind in [61], [66] und [49] zu finden. Allgemeine Informationen zu Röhren und deren Anwendung finden sich z.B. in [55], [56] und [57], siehe Literaturverzeichnis.

## 5 Spulen

Beim Theremin werden Induktivitäten hauptsächlich für die Antennenverlängerungsspulen und die Oszillators spulen eingesetzt.

## 5.1 Luftspulen

In Leon Theremins Instrumenten sind die HF-Induktivitäten als Luftspulen ausgeführt. Um einen ausreichenden Gütefaktor zu erreichen, wurden Spulenkörper mit großem Durchmesser und dicke Drähte verwendet. Dennoch ist die Güte im Vergleich zu heutigen Induktivitäten recht gering. Dies muss berücksichtigt werden, wenn in neuen Konstruktionen versucht wird, die großen Luftspulen durch kleinere Ferritkernspulen zu ersetzen. Bei Verwendung von Kernen mit relativ geringer Permeabilität ist der Temperatureinfluss ausreichend gering und der Vorteil geringerer Abmessungen überwiegt. Da das Theremin auf Kopplungseffekten zwischen den Spulen beruht, sind abgeschirmte oder gekapselte Spulen nicht vorteilhaft, wenn man dem ursprünglichen Design folgt.

## 5.2 Ferritstäbe und Kammer-Spulenkörper

Es sollten Ferritstäbe verwendet werden, die ausreichend externe Magnetfelder erzeugen. Bei den Oszillatorspulen scheint die Nebeneinander-Wicklungsweise gewisse Interferenzen zu erzeugen (wie zuvor beschrieben). Wenn möglich, sollten daher bifilare Wickeltechniken verwendet werden. Die Antennenverlängerungsspulen können auf lange Kammer-Spulenkörper mit innenliegendem Ferritstab gewickelt werden. Aufgrund der vielen Kammer-Abschnitte kann die Eigenkapazität auf Bruchteile eines Picofarad gebracht werden und damit die Eigenresonanzfrequenz ausreichend hoch gelegt werden.

## 6 Audiotransformatoren

Die Audio-Zwischenstufentransformatoren, wie sie in der Anfangszeit des Radios verwendet wurden, hatten viele Mängel. Die Grenzfrequenz der sehr frühen Modelle lag nur unwesentlich über 1kHz, spätere Transformatoren waren für den Tonfrequenzbereich des AM-Radios optimiert, der normalerweise bis 4,5kHz reicht. Daher zeigen diese Transformatoren einen recht großen Pegelanstieg bei 3 kHz bis 4 kHz mit raschem Abfall oberhalb dieser Frequenzen.

### 6.1 Breitband-Transformatoren

Breitband-Transformatoren der späten 1930er Jahre waren in der Lage, bis zu 10 kHz zu übertragen (damals als hochwertiges Audio bezeichnet). Aufgrund der AM-Kanaltrennung wurde in Europa meist eine scharfe Absenkung bei 9kHz realisiert, um Störtöne von Nachbarsendern zu unterdrücken. Zwischenstufen-Transformatoren sind heute selten und schwer zu finden. Im ursprünglichen Theremin-Design ist es erforderlich, einen geeigneten Transformator (oder zumindest eine Drossel) zu verwenden, um den Einzelsinus-Impuls in der Phasendetektorstufe zu erzeugen.

### 6.2 Netztransformator als Phasendetektor-Zwischentransformator

Bei richtiger Wahl der Induktivitätswerte für Primär- und Sekundärwicklung können alternativ kleine Netztransformatoren ohne nennenswerte Nachteile eingesetzt werden; zumindest in den vom Autor getesteten neuen Schaltungen. Natürlich muss beim Einsatz von Transformatoren ohne Luftspalt in Schaltungen ohne Gegentaktkonfiguration die Gleichstrombelastung so gering wie möglich gehalten werden, um die Induktivität nicht zu reduzieren. Natürlich können diese Transformatoren unter Verwendung von Gleichspannungs-Sperrkondensatoren auch wechsellspannungsgespeist eingesetzt werden.

## 7 Klanganalyse

Wie bereits erwähnt, fungiert der Lautsprecher hauptsächlich als Allpassfilter. Aufgrund der begrenzten Bandbreite sind natürlich auch Hoch- und Tiefpassfiltereffekte beteiligt. In Abhängigkeit von der Konstruktion des Lautsprecherchassis und der Schallwand ergeben sich Phasenverschiebungen und Formant-Verhalten für bestimmte Frequenzen, wodurch Klangfärbungen entstehen.

Diese Effekte können beobachtet werden, wenn das Theremin-Klang-Signal, das vor dem Lautsprecher mit einem Mikrofon (mit linearem Phasen- und Frequenzgang) aufgenommen wurde, mit dem direkt vom Theremin-Endstufenausgang oder vom spannungsgesteuerten Begrenzer-Verstärker Ausgang z.B. am Oszilloskop angezeigt und verglichen wird. Beide Signalformen haben nicht mehr viel gemeinsam. Im Gegensatz dazu gibt es beim Vergleich der Spektren keinen wesentlichen Unterschied, außer natürlich das Hoch-/Tiefpassverhalten und eventuell zusätzliche Resonanzeffekte des Lautsprechers.

### 7.1 Direktaufnahmen

Direktaufnahmen des Rockmore- oder Rosen-Instruments (das Aufnahmegerät ist hier z.B. mit dem Theremin-Lautsprecheranschluss direkt verbunden) sind nicht bekannt. Daher ist die Signalform, wie sie von diesen Instrumenten am Lautsprecher-Anschluss erzeugt wird, derzeit unbekannt.

### 7.2 Signale im Zeit- und Frequenzbereich

Aufgrund der verschiedenen, sich schnell verändernden Signalformen (Zeitbereich) sind für die Klang-Analyse nur Signalspektren (Frequenzbereich) geeignet. Selbst bei Klavierbegleitung ist das typische Spektrum des Rockmore Theremin-Instruments in den vorliegenden Aufnahmen wie ein Fingerabdruck deutlich sichtbar; egal wie miserabel die Tonaufnahmequalität auch sein mag. Wie bereits erwähnt, ist es ein Ziel der Untersuchungen, den „Rockmore“-Klang wieder zu erschaffen. Alle (nach-) gebauten (und simulierten) klangerzeugenden und -beeinflussenden Schaltungen wurden im Hinblick auf die Ähnlichkeit der Audiospektren mit dem „Rockmore“-Klang genau untersucht.

### 7.3 Klangspektren

Die Klang-Signalspektren bestehen aus dem unteren, mittleren und hohen Bereich. Das auffälligste (und am einfachsten zu beschreibende) „Rockmore“-Teilspektrum ist der Mittlere-Tonhöhenbereich. Die Spektrallinien um die Frequenz von 220Hz sind typischerweise wie folgt in Gruppen angeordnet:

- a) Grundwelle (220Hz), 2., 3. Harmonische nahezu mit gleicher Amplitude
- b) 4. Harmonische fast vollständig unterdrückt (lautstärkeabhängig)
- c) 5., 6., 7. Harmonische fast gleich in der Amplitude, aber niedriger als bei a)
- d) 8. Harmonische fast vollständig unterdrückt (lautstärkeabhängig)
- e) die Spektrallinienfolge (3 Linien - 1 unterdrückt - 3 Linien) wiederholt sich mit abnehmender Amplitude (Abbildung 6)

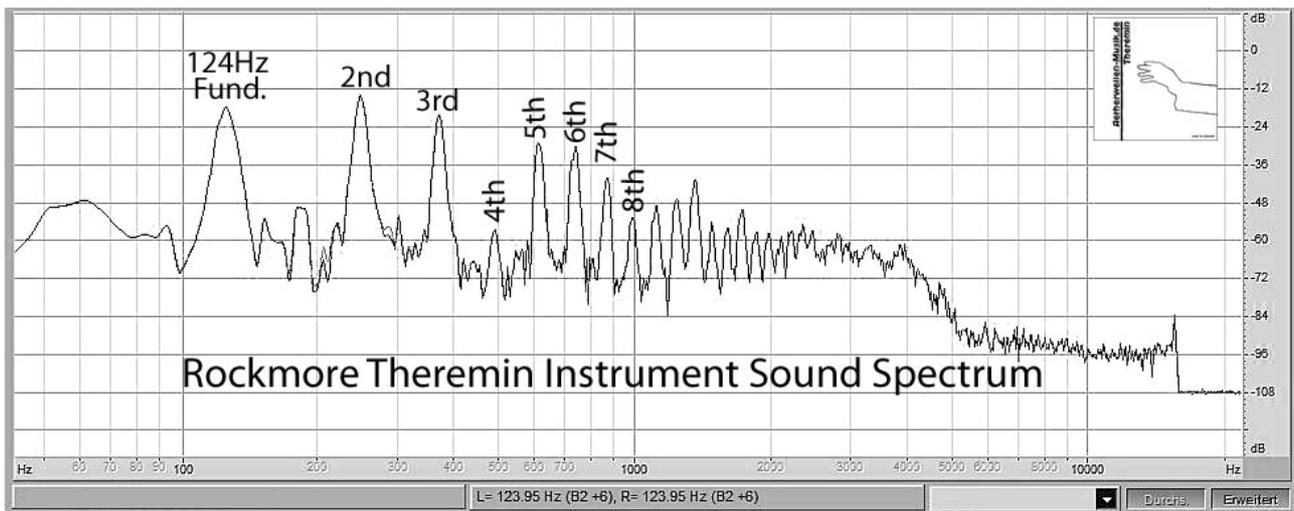


Abbildung 6: Rockmore Theremin Spektrum

#### 7.4 Flüstern und Schreien

Es muss erwähnt werden, dass die Audio-Pulsbreite und damit das Klangspektrum lautstärkeabhängig ist. Mit steigender Lautstärke (insbesondere wenn diese sehr groß ist) wird die Unterdrückung der 4., 8. und weiterer Obertöne reduziert. Die eigentliche Lautstärke wird dann subjektiv als „lauter“ empfunden. Dies ist vergleichbar mit der Unterscheidung von Flüstern und Schreien. Wenn Flüstern verstärkt und mit viel höherer Lautstärke wiedergegeben wird, ist es dennoch als Flüstern zu erkennen.

#### 7.5 Quelle des untersuchten Audiosignals

Das untersuchte Klangspektrum stammt aus dem bekannten Video „Clara Rockmore: The Greatest Theremin Virtuosa“ von R. Moog welches im Jahr 1976 aufgenommen wurde. Clara Rockmore spielt hier das Instrument, das von Leon Theremin entsprechend ihren Vorstellungen gebaut wurde. Es wird davon ausgegangen, dass das Instrument zu diesem Zeitpunkt in einwandfreiem Zustand war und der Klang daher als Referenz für die Analyse des Spektrums dienen kann.

Anzumerken ist, dass spätere Aufnahmen wie z.B. „Clara Rockmore's Gift-Tape“ von 1997 oder von D. Warshaw mit dem Instrument im Jahr 2010, das beschriebene Klangbild so nicht mehr aufweisen. Es ist davon auszugehen, dass dies nicht daran liegt, dass der Klang nur von Clara Rockmore mit genau diesem Instrument erzeugt werden kann, sondern es ist viel wahrscheinlicher, dass die merkliche Veränderung des Klangspektrums hier durch fehlende oder falsche Wartung (z.B. durch Ersatz der historischen Röhren aus den 1920/30er Jahren durch in den 1940er Jahren hergestellte mit höherer Verstärkung/Strombelastbarkeit, selbst wenn diese vom gleichen Röhrentyp sind) verursacht wird.

#### 7.6 „Rockmore“- Spektralsignatur

Ist die angegebene Spektralsignatur in einem Klang erkennbar, ist es wahrscheinlich, dass sie dem „Rockmore“-Klangeindruck entspricht. Die tiefen und hohen Töne zeigen keine so klare Struktur wie oben beschrieben. Der Autor hat mehrere Versuche unternommen, dieses Zielklangspektrum nachzubilden. Der einfachste Weg war, die Grundlagen der ursprünglichen Schaltung genau zu befolgen und den Einzelsinus-Audioimpuls mit entsprechendem Puls-Pausen-Verhältnis einem Begrenzer-Verstärker zuzuführen. Es

entsteht ein rechteckiger Doppel-Puls, dessen asymmetrische Amplitude und Breite von Tonhöhe und Lautstärke abhängig ist. Am wichtigsten für das Spektrum und damit den Klang ist die Pulsbreite des rechteckförmigen Signalanteils mit großer Amplitude, eine Änderung der Pulsdauer bestimmt, ob z.B. die 4. / 8. Harmonischen ausreichend unterdrückt und die spektralen Amplituden innerhalb einer Dreiergruppe entsprechend stark sind.

### **7.7 Blas-Synthesizer REALTON „Variophon“**

Frequenzabhängige Pulsbreiten wurden auch verwendet, um die wesentlichen Klangeindrücke von Blasinstrumenten im Variophon, einem historischen 1980er Jahre Blas-Synthesizer, der von der deutschen Firma REALTON [41] hergestellt wurde, zu erzeugen. Die allgemeinen Prinzipien der Klangfärbung durch Variation von Impulsbreite und Impulsverhältnis wurden bereits in den 1920er Jahren von K.E. Schumann erforscht [40].

### **7.8 Rechteckimpulse zur Klangformung bei L.D. Koroljow und R. Moog**

Auch L.D. Koroljow beschrieb die Umwandlung des detektierten Audiosignals in Rechteckimpulse und die Anwendung von Formantfilter-Techniken zur Erzeugung von Klangfarben [70] (L.D. Koroljow: 'Modernes Theremin' Radio, 1985 Nr. 2 & 1985 Nr. 3 / Л. Д. Королёв : ' Современный терменвокс' Радио, №2 1985г. и №3 1985г).

R. Moog nutzte eine dem Vollwellengleichrichter ähnliche Signalform, um ebenfalls Rechteckimpulse für die weitere Klangverarbeitung in seinem röhrenbasierten Instrument Modell 351 zu erzeugen [71] (R. Moog: „Music from Electrons“, Audiocraft, Audiocom Inc. Great Barrington Mass. USA, Nr.8, Juni 1956).

Es ist nicht bekannt, ob sich bei den Instrumenten von Koroljow und Moog die Pulsbreite zusammen mit der Tonhöhe änderte, um einen angenehmen Klang über den gesamten Tonumfang zu erzeugen. Es ist anzunehmen, dass dies nicht der Fall war, denn beide erwähnen nicht die Bedeutung des Puls-Pausen-Verhältnisses, das das Klangspektrum und damit die Klangfarbe des Theremin-Instruments bestimmt. Die Hauptwirkung auf den Klang wurde hier offenbar durch das Filtern der Wellenformen, die über komplexe Schaltungen aus dem detektierten Audiosignal erzeugt wurden, erreicht.

### **7.9 EW Standard Theremin Klangfarbe**

Im EW Standard Theremin von R. Moog ist die Begrenzung der detektierten vollwellengleichrichterähnlichen Wellenform zu Rechteckimpulsen möglich, wenn Wellenform- und Klanghelligkeitsregler entsprechend eingestellt sind. Trotzdem kann kein angenehmer Klang erreicht werden, da die Pulsbreite nicht ausreicht und auch nicht entsprechend eingestellt werden kann. Wie man das EW-Theremin für den typischen „Rockmore“ ähnlichen Klang modifiziert, beschreibt der Autor unter EW Standard Theremin Modifikation: EW Standard Theremin „Rockmore-Sound Modification“.

### **7.10 RCA Theremin Klangfarbe**

Nun ein paar Worte zum Klang des RCA Theremins. Das RCA Theremin wurde 1928/29 hergestellt, unter Verwendung von Komponenten, die bereits im Radiola 60 Rundfunkempfänger eingesetzt wurden. Das RCA Theremin wurde parallel hergestellt, um die Kosten zu senken. Laut der RCA-Werbung zeichnete sich der Radiola 60 Empfänger durch eine „wunderbare musikalische Bandbreite und Klangtreue“ aus.

### **7.10.1 RCA Radiola 106 Lautsprecher**

Es wurde empfohlen, den dynamische Lautsprecher RCA Radiola 106, laut RCA-Werbung [72] ein „unvergleichliches Wiedergabeinstrument von erstaunlichem Klang-Umfang“ mit dem RCA-Theremin zu verwenden. Es muss beachtet werden, dass dieser Lautsprecher den Audio-Endstufentransformator enthält, nicht das Radio oder das Theremin-Instrument.

### **7.10.2 Audio-Zwischentransformatoren**

Sowohl beim Radiola 60 als auch beim RCA Theremin wurden Audio-Zwischenstufen-Transformatoren verwendet, um die Audioverstärkerstufen zu koppeln und gleichzeitig den Verstärkungsfaktor zu erhöhen. Zu dieser Zeit waren nur Trioden-Röhren mit niedriger Verstärkung üblich, daher wurden die Zwischenstufentransformatoren allgemein eingesetzt, um eine höhere Verstärkung mit weniger Röhren zu erreichen; dies hatte natürlich den Nachteil des eingeschränkten Frequenzgangs. Dieser erreichte typischerweise seinen Maximalwert bei etwa 1 kHz (er wurde auf 4 kHz und später auf 9 kHz erweitert). Der Frequenzgang der frühen Zwischenstufentransformatoren war extrem begrenzt, da diese große Induktivitäten (entsprechend den Röhrenanforderungen und dem hohen Spannungswandlungsverhältnis) mit hohen Eigenkapazitäten der Wicklungen hatten.

### **7.10.3 Verzerrungen und Formant-Effekte**

Zu dieser Zeit war diese Klangqualität mit niedriger oberer Grenzfrequenz ausreichend, da Rauschen und Effekte von Audioverzerrungen reduziert wurden, während Resonanzeffekte hinzukamen, die zusätzliche Klangfärbungen (möglicherweise durch die Röhren-Verzerrungen begünstigt) verstärkten. Die frühen Sendestationen übertrugen nur einen Tonfrequenzbereich von etwa 200Hz bis 2,5kHz [73].

Was bedeutet das alles nun für den RCA-Theremin Klang? Aus den vorliegenden frühen Aufnahmen des RCA Theremins lassen sich starke Formanten im Klang des Instruments feststellen. Dies ist die Wirkung der Zwischenstufenübertrager und des Ausgangsübertragers, die bei bestimmten Frequenzen, die Vielfache von etwa 1kHz sind „klingeln“, angeregt durch das weitgehend rechteckige Audiosignal, das die Begrenzer-Verstärkerröhren-Stufe an ihrem Ausgang liefert. Darüber hinaus haben die Unvollkommenheiten des RCA 106 Lautsprechers auch einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Klangqualität des Instruments. Wenn z.B. die Zwischenstufenübertrager des RCA-Theremins durch moderne (Breitband-) Typen ausgetauscht würden, hätte dies eine dramatisch veränderte Klangfarbe zur Folge, da die Formant-Filterwirkung der alten Übertrager nicht mehr vorhanden wäre. Wenn also ein Originalübertrager ersetzt werden muss und der Klang dann die Formanteffekte nicht mehr zeigt, kann es hilfreich sein, parallel zur hochohmigen Sekundärwicklung zumindest einen kleinen Kondensator hinzuzufügen, um ein Nachschwingen um 1kHz zu erreichen.

## **8 Fazit**

Wie man sieht, ist die Schaltungsfunktion abhängig von den Bauteilwerten, Arbeitspunkten und insbesondere den parasitären Effekten der Komponenten. Wenn man sich genau an die grundlegenden Prinzipien hält, die Leon Theremin beim Design der Rockmore/Rosen Theremin Instrumente angewandt hat, können ähnliche Instrumente mit gleicher Klangqualität konstruiert werden, selbst unter Verwendung anderer Komponenten. Hervorzuheben ist, dass die hier erläuterten Effekte in den vorliegenden Aufnahmen von Clara Rockmore festgestellt werden können und Eigenschaften des für sie von Leon

Theremin persönlich gebauten Instruments sind.

Die Schaltungsteile können nicht voneinander getrennt werden; sie arbeiten zusammen und formen den Klang des Röhren-Theremins, wie es von Leon Theremin in enger Zusammenarbeit mit Clara Rockmore und Unterstützung von Lucy Rosen entworfen wurde.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] 'Method of and Apparatus for the Generation of Sounds' Patent US1661058, Leo Sergejewitsch Theremin - Leningrad / M.J. Goldberg & Söhne, Berlin, 28.02.1928
- [2] 'RCA Theremin Service Notes', RCA 1929
- [3] 'Clara Rockmore's Theremin Schematics', R. Moog 1989
- [4] 'Clara Rockmore's Theremin Service Notes', R. Moog 1989 / R. Welch 1997
- [5] 'Lucie Rosen's Theremin Schematics', L. Termen 1938 / G. Gruendel
- [6] 'Lucie Rosen's Theremin Notebook', L. Rosen 1940 / J. Snyder
- [7] 'Das Theremin-Musikgerät – Aetherwellen-Musik ... ein neues Reich der Töne!', Ing. Joachim Winckelmann, DRB46 Deutsche Radio-Bücherei, Deutsch-Literarisches Institut J. Scheider, Berlin-Tempelhof, 1932
- [8] 'Das neue Universal-Schaltungsbuch – Die 120 modernsten und besten Schaltungen!', Ing. Joachim Winckelmann, DRB25 4. Auflage, Deutsche Radio-Bücherei, Deutsch-Literarisches Institut J. Scheider, Berlin-Tempelhof, 1932
- [9] 'Die technischen Grundlagen von Theremin's Aetherwellen-Musik', A. Lion, Zeitschrift für Instrumentenbau Jahrgang 48. Nr.5 1.12.1927, Paul de Wit, Leipzig, 1927
- [10] Sound-Generator, elrad 1979 Heft 1 S.18-22
- [11] Hagstroem 210 Bass Principschema, Hagström 04.11.1964
- [12] Novachord: 'A Manual For The Service Technician', Hammond Instrument Company 1938
- [13] Novachord: 'Electrical Musical Instrument' Patent US2126464, L. Hammond 09.08.1938
- [14] 'Sound Chapter I.', E. M. Villchur, AUDIO 8-1955, S.30/31/33/34/56  
Audio Patents: 'Hammond: Solovox - J. Hanert US2514490', Richard H. Dorf, AudioEngineering 8-1951, S.2/4/47/48
- [15] 'Resonance Effects with R-C Circuits', G. Southworth, AUDIO 11-1954, S.20/21
- [16] Audio Patents: 'Minshall: FREQUENCY DIVIDER - G.H. Hadden US2665379', Richard H. Dorf, AUDIO 4-1954, S.2/4/6
- [17] 'The New Minshall Organ - Part I.', Richard H. Dorf, AUDIO 9-1955, S.25/26/27/59
- [18] 'The New Minshall Organ - Part II.', Richard H. Dorf, AUDIO 10-1955, S.54/55/58/60/73
- [19] 'Video-Handbuch', Ru van Wezel / W. P. Ottenbreit, Franzis-Verlag, München, 1979
- [20] 'Electronics and Music XXIV: The simple Minshall Electronic Organ', Richard H. Dorf, Radio-Electronics 6-1952, S.44/45/46/47
- [21] 'Electronics and Music XXV: Further interesting features of the Minshall Electronic Organ', Richard H. Dorf, Radio-Electronics 7-1952, S.48/49/50
- [22] 'Electronics and Music XXVI: More on the Minshall Organ', Richard H. Dorf, Radio-Electronics 8-1952, Pages 44-46
- [23] 'Modulation Distortion in Loudspeakers I. & II.', Paul W. Klipsch, Journal of the Audio Engineering Society Vol. 17-2, 4-1969
- [24] 'Sineward Distortion in High-Fidelity Amplifiers', J. W. Campbell JR., AUDIO 11-1961, S.52/54/56/58/90

- [25] 'What's All This About Damping?', N.H. Crowhurst, AUDIO 8-1955, S.17/18/21
- [26] 'Output Transformer Design', N.H. Crowhurst, AUDIO 8-1956, S.20-23/89-94
- [27] 'Baffles Unbaffled', E.J. Jordan, AUDIO 8-1956, S.34/36/38/40/42/82-86
- [28] Audio Patents: 'Bell-Labs: SPEECH ANALYZING AND SYNTHESIZING COMMUNICATION SYSTEM - J.C. Steinberg US2635146', Richard H. Dorf, AUDIO 4-1954, S.2/4/6/44
- [29] Audio Patents: 'Hammond: ELECTRICAL MUSICAL INSTRUMENT (with Pitch Correction) - J. Hanert US2514490', Richard H. Dorf, Audio Engineering 9-1951, S.2/4/47/48
- [30] Audio Patents: 'UK Marconi: GAIN CONTROL CIRCUIT ARRANGEMENTS - E. Davies US2721909', Richard H. Dorf, AUDIO 2-1956, S.2/4/62
- [31] 'Sine Waves from Pulses', Radio-Electronics 5-1952, S.120
- [32] 'Secret Tuning', J. K Frieborn, Radio-Electronics 5-1952, S.61-63
- [33] 'The Universal Vibrato', Richard H. Dorf, Radio & Television News 4-1954, S-52/53/90/92/93
- [34] 'Electronic Organ in Kit Form [...] Part III.', Richard H. Dorf, AUDIO 2-1956, S.23-25
- [35] 'Theremin - Ether Music and Espionage', A. Glinsky, University of Illinois Press, 2000
- [36] 'Radiobasteln für Jungen', Heinz Richter, Franckh'sche Verlagshandlung W. Keller & Co Stuttgart, 1955/1963
- [37] 'Der Empfang kurzer Wellen', H. Günther / H. Kröncke, Franckh'sche Verlagshandlung W. Keller & Co, Stuttgart, 1926
- [38] 'Lehrbuch der Hochfrequenztechnik Band II.', F. Vilbig, 4. Auflage, Akademische Verlagsgesellschaft Becker & Erler, Leipzig, 1944
- [39] 'Wege in die Elektronik', J. Glagla / G. Lindner, Otto Maier Verlag, Ravensburg, 1980
- [40] 'Die Schumannschen Klangfarbengesetze und ihre Bedeutung für die Übertragung von Sprache und Musik', P.H. Mertens, Verlag E. Bochinsky, Frankfurt a.M., 1975
- [41] 'Die digitale Impulsformung als Werkzeug für die Analyse und Synthese von Blasinstrumentenklängen', M. Oehler, Internationaler Verlag der Wissenschaften Peter Lang GmbH, Frankfurt a.M., 2008
- [42] 'Handbuch der Radio- und Fernseh-Reparaturtechnik - Band 2: Fernseh Service', Werner W. Diefenbach, Franckh'sche Verlagshandlung W. Keller & Co, Stuttgart, 1968
- [43] 'Konzert und Präsentation: Aetherwellen-Musik, L. Theremin, München, Odeon, 12.11.1927', ARNOLD CLEMENT, SÜDDEUTSCHE KONZERTDIREKTION OTTO BAUER GmbH, München, 1927
- [44] 'Lehrbuch der Hochfrequenztechnik Band I.', F. Vilbig, 4. Auflage, Akademische Verlagsgesellschaft Becker & Erler, Leipzig, 1945
- [45] 'Taschenbuch der Hochfrequenztechnik', H. Meinke/F.W. Gundlach, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1962
- [46] 'Tabellenbuch Radio- und Fernsehtechnik, Funkelektronik', Benz/Heinks/Starke/Zastrow, 1. Auflage, Kohl u. Noltemeyer/Frankfurter Fachverlag, 1989
- [47] 'Funktechnik ohne Ballast', Otto Liemann, 10. Auflage, Franzis-Verlag, München, 1969
- [48] 'Schaltungstechnik der Loewe Opta Fernsehempfänger', F. Möhring, 3. Auflage, Loewe Opta AG, Berlin-West/Kronach-Bayern/Düsseldorf, 1964
- [49] 'Das große Röhren-Handbuch', Ludwig Ratheiser, Franzis-Verlag, München, REPRINT 1995
- [50] 'Handbuch der Radioreparaturtechnik', Werner W. Diefenbach, 3. Auflage, Franckh'sche Verlagshandlung W. Keller & Co, Stuttgart, 1958
- [51] 'Handbuch der Radioreparaturtechnik Band 4: Farbfernseh-Service', Werner W. Diefenbach, Franckh'sche Verlagshandlung W. Keller & Co, Stuttgart, 1969
- [52] 'elektor BUCH 70', Sonderausgabe Jahrgang 1-1970, 4. Auflage, Elektor Verlag,

- Buscherheide, 1972
- [53] 'Elektronik in Selbstbau und Versuch', Heinz Richter, 6. Auflage, Franckh'sche Verlagshandlung W. Keller & Co, Stuttgart, 1961
- [54] 'The C1-94 Universal Service Oscilloscope: Instruction Manual, Certificate', Belvar, Minsk (USSR), 1982
- [55] 'Röhrentechnik ganz modern', Winfried Knobloch, 2. Auflage, Pflaum Verlag, München, 1993
- [56] 'Daten und Schaltungen von Fernseh-Empfängerröhren', J. Jager, N.V. Philips Gloeilampenfabriken, Eindhoven (Holland), 1953
- [57] 'Daten und Schaltungen moderner Empfänger- und Kraftverstärkerröhren', (J. Deketh), 2. Auflage, N.V. Philips Gloeilampenfabriken, Eindhoven (Holland), Verlag R. Kiepert, Berlin, 1940
- [58] 'Funk Messtechnik für Radio-Techniker und -Bastler', Kurt Nentwig, Deutsche Radio-Bücherei Band 34, 5. Auflage, Deutsch-Literarisches Institut J. Scheider, Berlin-Tempelhof, 1941
- [59] 'RADIOLUX / RADIOSTAT / RADIOFOR', Elektrizitätsgesellschaft Sanitas, Berlin, 1926
- [60] 'Die RADIOLUX Behandlung', M. Albrecht, Elektrizitätsgesellschaft Sanitas, Berlin, 1926
- [61] 'Amerikanische Röhren, Russische Röhren', Fritz Kunze, 2. Auflage, Funkschau-Verlag, München, 1942
- [62] 'Radio Physics Course', A. A. Ghirardi, Farrar & Rinehart, 2nd ed. , 1932 (S.580 : 390. Choice of the intermediate frequency)
- [63] 'Fundamentals of Electronics Volume 4 - Receiver circuit applications', Bureau of Naval Personnel, Washington D.C. 20370, 1965 (S.107: 35-1. Choice of IF Frequency)
- [64] 'Die Erfindung des Tonfilms', Dr. h.c. Hans Vogt, Erlau, 6. Auflage, 1954
- [65] 'Mathematische Methoden in der Hochfrequenztechnik', Klaus Pöschl, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1956
- [66] 'The RCA Radiotron Manual R-10', RCA Radiotron CO. Inc, Harrison – New Jersey, 1932
- [67] 'Understanding, Customizing, and Hot-Rodding your Etherwave', R. Moog, Moog Music Inc., Asheville USA, 2003
- [68] 'Build the EM Theremin', R. Moog, Electronic Musician, Feb. 1996
- [69] 'Setting up and playing the MOOG Etherwave Theremin', Moog Music Inc., Asheville USA, 2020
- [70] 'Modernes Theremin', L.D. Koroljow, Radio No. 2 & No. 3 1985 / Л. Д. Королёв 'Современный терменвокс', Радио №2 1985г и №3 1985г
- [71] 'Music from Electrons', R. Moog, Audiocraft, Audiocom Inc. Great Barrington Mass. USA, No.8 June 1956
- [72] 'Vintage Radio', M.E. McMahon, Vintage Radio, USA, 1973
- [73] 'RCA RADIOLA 60 Super-Heterodyne & RCA Electro-Dynamic Speaker 106', RCA advertisement, National Geographic, Feb, 1929
- [74] 'Die Klangfarbe des Theremins', W. Voigt / C. Reuter, Conference KlangArt-Kongreß 1999, Global Village - Global Brain - Global Music, Enders / Stange-Elbe, Osnabrück, 1999
- [75] 'Off-center loaded dipole antennas', J. Hall, QST Sept. 1974, S.28-34
- [76] 'Antenna with Series Inductance', Radio Instruments and Measurements, USA Bureau of Standards Circular C74, 1924/1937, S.76
- [77] 'Radiotron Designer's Handbook - 4th Edition', F. Langford-Smith, Wireless Press / AWVC PTY. Ltd. - Sydney / RCA Inc, Harrison – New Jersey, 1953/1960

[78] 'Reference Data for Radio Engineers 4th Edition', International Telephone and Telegraph Corporation, American Book – Stratford Press Inc., New York, 1957

[79] 'Hochfrequenztechnik I.', J. Kammerloher, 5. Auflage, Lehrbücher der Feinwektechnik/K. Gehlhoff/Berlin, Winter'sche Verlagshandlung, Leipzig, 1941, S.141