

1 Das THEREMIN

1.1 Geschichtliches

Der Russe Lew Sergejewitsch Termen (1896–1993) - der sich im Westen Leon Theremin nannte - entwickelte um 1920 am Physikalisch-Technischen Institut in St. Petersburg ein elektronisches Musikinstrument, bei dem die Hände des Spielers durch entsprechende Bewegungen über zwei Antennen zur Beeinflussung von Tonhöhe und Lautstärke eines Tonsignals führten. Später kam noch ein Fusspedal für die Klangfarbe hinzu. Im deutschen Sprachraum wurde dieses neuartige Musikinstrument ob seines ungewöhnlichen Klanges als "Ätherophon" bezeichnet, bis sich nach und nach der Name Theremin (Thereminovox) schliesslich durchsetzte. Als eine der besten Spielerinnen galt Clara Rockmore. Auch Lydia Kavina, die Großnichte Termens, offenbarte sich als Virtuosin auf diesem Instrument.

In den zwanziger und dreissiger Jahren wurden weitere elektronische Instrumente entwickelt, unter diesen das Trautonium (1928) von Friedrich Trautwein. Etwa zur selben Zeit baute Maurice Martenot das 'Ondes martenot', das ähnlich wie das Trautonium funktioniert, aber zusätzlich mit einer Tastatur ausgestattet war. Weitere - damit vergleichbare - Instrumente waren das Sphärophon (1926) von Jörg Mager und das 'Croix Sonore' (1934) von Armand Givelet. Die auf einem völlig anderen Prinzip basierende Hammondorgel wurde erst 1935 von Laurens Hammond verwirklicht.

Lew Termen - der am St. Petersburger Konservatorium und parallel dazu an der Elektrotechnischen Miltärhochschule (dem späteren



Abb. 1: Geistermusik mit dem Theremin

nischen Miltärhochschule (dem späteren Leningrader Polytechnischen Institut) studierte - war auch in der aufkommenden Fernsehtechnik aktiv, indem er die Löcher der Nipkow'schen Scheibe durch Spiegelanordnungen ersetzte und auf diesem Wege Projektionen mit 100 Bildzeilen erreichte. Stalin erkannte sofort die Bedeutung dieser Technologie und stellte die Erfindung unter Geheimhaltung. Das ist der Grund dafür, weshalb der Erfinder des ersten sowjetischen Fernsehens in keinem Lexikon erwähnt wurde. In gewissem Sinne erging es ihm wie Philo Farnsworth, dem us-amerikanischen TV-Erfinder.

Für rund zehn Jahre lebte Termen in New York, bis er 1938 unter ungeklärten Umständen nach Russland zurückkehrte, um zunächst im Gulag zu verschwinden. In den

USA besass Termen ein eigenes Studio, in dem Grössen wie Gershwin, Ravel, Heifetz und Menuhin verkehrten. Zu seinen illustren Besuchern zählten Schriftsteller wie Shaw und

Hauptmann und die Regisseure Chaplin und Eisenstein. Albert Einstein - damals nach einer Analogie zwischen Musik und Raumbildern suchend - spielte zusammen mit dem Erfinder Jaz-Improvisationen nach Gershwin.

Später - inhaftiert in den eisigen Lagern der UdSSR - entwickelte Termen ein funktechnisches Gerät (heute würde man von elektronische Wanzen sprechen) für den KGB, wofür er den Stalinorden 1. Klasse erhielt. Nach seiner Freilassung im Jahre 1958 war er gezwungenermaßen weiterhin für den Geheimdienst tätig, bis er – der Journalistin Tatjana Kuschtewskaja ("Mein geheimes Russland") zufolge – als einfacher Mechaniker (!) am Lehrstuhl für Akustik der Moskauer Universität eine Anstellung erhielt. Vier Jahre später soll er lt. anderen Quellen an die Physikalische Fakultät der Universität Moskau versetzt worden sein. 1970 erschien sein Buch "Erinnerungen an A.F. Joffe" im sowjetischen Verlag der Akademie der Wissenschaften. Termen - auch als der "sowjetische Faust" bezeichnet - verstarb im Alter von 97 Jahren in Moskau.

Gewiss, der Erfinder des Theremins war ein aussergewöhnlicher Mensch:

Das Theremin eroberte sich seinen Platz u.a. in der Filmmusik, wo es zur Erzeugung sphärisch dichter Stimmungen eingesetzt wurde, erstmals in "The Lost Weekend" sowie "Spellbound" mit Miklos Rosza als Komponisten. Die Rockband 'Led Zeppelin' setzte das Instrument bei "Whole Lotta Love" ein. Es gäbe noch viele Beispiele.

1.2 Funktionsweise

a) Die musizierende Person greift unmittelbar in das Nahfeld zweier Antennen (Pitch-Antenne für die Tonhöhenbeeinflussung und Volume-Antenne für die Lautstärkebeeinflussung) ein und bewirkt durch kapazitive Kopplung eine Verstimmung der nachgeschalteten Oszillatoren.

b) Für die Tonhöhe werden zwei Oszillatoren verwendet, deren Ausgangssignale gemischt werden. Durch Bewegungen der rechten Hand gegenüber der stabförmigen Pitch-Antenne (vertikal) wird der variable Oszillator verstimmt. Der zweite Oszillator (LO) ist frequenzstabil und schwingt auf ca. 200 kHz. Die Differenzfrequenz (Schwebung) gelangt über einen Tiefpass auf den Audio-Vorverstärker, bevor das Tonsignal einer Endstufe zugeführt wird.¹

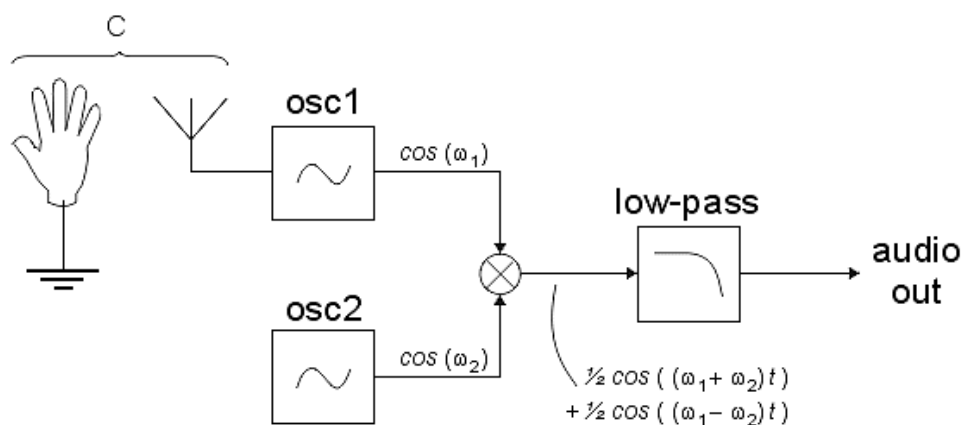


Abb. 2: Prinzipschem des Theremin's (Pitch-Oszillator)

¹ <https://www.elektronik-labor.de/HF/Theremin4.html>

Anm.: Schwebungssummer (BFO) arbeiten nach dem Überlagerungsprinzip. Am Ausgang erscheint eine Schwebung mit $f = f_{\text{const}} - f_{\text{var}}$. Im Amateurfunk wird der BFO eingesetzt, um aus einem SSB den unterdrückten Träger wieder herzustellen.

c) Für die Lautstärkeregelung wird ein dritter Oszillator verwendet, der bei entsprechender Bewegung der linken Hand über der loopförmigen Volume-Antenne (horizontal) verstimmt wird und so mittels entsprechender Schaltungstechnik den Ausgangspegel (Volume) des NF-Amplifiers beeinflusst.

1.3 Schemata und Nachbaumöglichkeiten

Das Theremin wurde vor Jahrzehnten in den USA patentiert und die Produktionslizenz an RCA verkauft, die das Gerät fortan vermarktete. In den Anfängen wurden Elektronenröhren eingesetzt, später auch Transistoren und weitere Halbleiterelemente.

Theremin Röhren-Variante 1 (RCA, 1929):

http://sites.google.com/site/futurephysics/Home/theremin_rca.jpg

Theremin Röhren-Variante 2 (Doug Forbes, 1996):

http://sites.google.com/site/futurephysics/Home/tube-theremin_2.gif

Für den Selbstbau sind Halbleiter (Transistoren, Op-Amp's und IC's) auf kaschierten Leiterplatten vermutlich die fortschrittlichste Lösung.

Theremin Transistor-Variante (Arthur Harrison, 2000):

http://sites.google.com/site/futurephysics/Home/transistor_theremin.gif

Die Zeit bleibt bekanntlich nicht stehen, so dass sich für den Selbstbau inzwischen zusätzliche interessante Möglichkeiten anbieten.

Mit C-MOS-Bausteinen lassen sich auf einfache Weise spannungsgesteuerte Oszillatoren (VCO) und spannungsgesteuerte Verstärker (VCA) realisieren. PLL-Schaltungen (Phase-Locked-Loop) kommt im Kontext eine wichtige Bedeutung zu. Inzwischen sind auf dem Markt auch preisgünstige Analogbausteine wie der Doppel-Balance-Mischer NE 612 oder der Produktdetektor MC 1496 erhältlich. Am Ausgang des Produktdetektors steht bereits das fertige NF-Signal zur Verfügung. Für einen Kleinsignalverstärker eignet sich z.B. der TBA 810 mit 6 Watt Output. Selbst Verknüpfungen mit Synthesizern sind mittels FPGA's (Field Programmable Gate Arrey) kein unlösbares Problem und auch implementierbare MIDI-Schnittstellen sind denkbar. Damit eröffnen sich dem Anwender eine Vielfalt von Möglichkeiten.

Einige Musikhäuser bieten ausser fertigen Thereminen auch Bausätze an. Auch der Franzis Verlag vertreibt einen Bausatz. Höherwertig, aber auch teurer, ist das "Moog Etherwave Theremin Kit", das von verschiedenen Musikhäusern angeboten wird.

2 Das TRAUTONIUM

Wie das *Theremin* zählt auch das *Trautonium* zur Instrumentenfamilie der Elektrophone. Wie bereits beim Theremin waren auch beim Trautonium sog. Physikingenieure – die zudem eine musische Ader besaßen – massgebend an der Entwicklung beteiligt.

2.1 Geschichtliches

1) Erfinder dieses äusserst interessanten elektronischen Musikinstruments ist der Ingenieur Friedrich Trautwein (1888-1956). Der Öffentlichkeit vorgestellt wurde das "Urtrautonium" erstmals im Jahre 1930 am Berliner Fest "Neue Musik" mit Hindemith's "Triostück für drei Trautonien".

Zunächst wurde in der Folge von Telefunken eine kleine Serie von 200 Stück für die Hausmusik gebaut (sog. Volkstrautonium).

2) Das von Oskar Sala (1910-2002) – Physiker und Musiker in Personalunion – mit Unterstützung von Hindemith und seinem Lehnherrn Trautwein weiter entwickelte *Konzerttrautonium* beruht auf der subharmonischen Tonreihe. Dies gilt insbesondere auch für das von Sala nach dem Krieg (zwischen 1949 bis 1952) konstruierte *Mixturtrautonium*. Nebst einzelnen Tönen und Mehrklängen lassen sich mühelos auch Glissandi und Portamenti erzeugen, Vibrato auch auf den Hilfstasten.²

Anm.: Sala komponierte vorwiegend für den Film. Noch immer markant sind die angsterregenden Vogelschreie in Hitchcock's "Die Vögel", die in einem Berliner Hinterhof an Salas Trautonium entstanden. Auch in den Edgar-Wallace-Filmen "Der Fluch der gelben Schlange" (1962) und "Der Würger von Schloss Blackmoor" (1963) erklangen die eindringlichen Subharmonischen. Im Prinzip kann dieses Musikinstrument als Vorläufer des Synthesizers bezeichnet werden, erlaubt es doch Klänge, die auf konventionellen Instrumenten (mit Ausnahme der Glockenklänge) nicht zu erzeugen sind.

Von einer gewissen Tragik ist sicherlich:

Sala hat es zeitlebens nicht geschafft, jemandem das Spiel an seinem Instrument beizubringen. So gab es den einen und immer nur einen, der das Mixtur-Trautonium spielte. Der vielleicht unnahbare Eine vergrub sich in einsamer Höhe in eine Klang-Technik-Welt, war sich seiner Einmaligkeit sicher auch bewusst, genoss sie, wahrte sie – und nahm sie mit ins Grab.

Das Mixturtrautonium besitzt zwei Manuale und zwei Pedale (Fussregler). Für jedes Manual stehen 3 verschiedene Mixturen zur Verfügung. Die Kombination von 4 Subharmonischen wird als Mixtur bezeichnet, deren Wirkung einem Mehrklang entspricht.

3) In den 1960er Jahren wurde in der DDR ein vergleichbares Musikinstrument, das *Subharchord*, entwickelt, dessen im subharmonischen Spektrum befindliche Klangwelten beeindruckten. Als Hauptfinder gilt ein Ing. Ernst Schreiber, über den nicht sehr viel bekannt ist, ausser, dass er vermutlich auch für Löwe Radio in Berlin-Steglitz tätig war. Das Subharchord besitzt – ähnlich einem Klavier – ein Tastenmanual mit 3 Oktaven Tonumfang. Mittels einem

² Mixturtrautonium im Deutschen Museum Bonn:

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/59/Mixtur_Trautonium.jpg

Glissandoregler können die Oktaven stufenlos überstrichen werden.³

Schaltungstechnisch war diese Erfindung anspruchsvoll: Steuergenerator, Impulsformer und Vibratogenerator; binäre und subharmonische Frequenzteiler inkl. Nebengeneratoren; Trennstufen und eine Filtersummierungsschaltung; eine druckabhängige Lautstärkenregelung; ein Ringmodulator; eine Abklingeinrichtung; ein Chormodulator; Formant- und Bandpassfilter (nach Mel-Skala); eine Rhythmisierungseinrichtung - das sind in etwa die wesentlichen Komponenten dieses einzigartigen elektronischen Musikinstrumentes.

Grosse Verbreitung wird das Instrument aber nicht gefunden haben. Auch Salas Instrumente blieben gewissermassen Prototypen, so dass noch heute gilt: "Wer ein Trautonium will, muss sich eins bauen."

4) In den Jahren 1982 bis 1983 wurde an der Fachhochschule der Deutschen Bundespost Berlin (später Fachhochschule der Telekom Berlin) unter der Leitung der Professoren Dipl.-Ing. Hans-Jörg Borowicz, Dr. Dietmar Rudolph und Dr. Helmut Zahn ein Mixturtrautonium in Halbleitertechnik nachgebaut. Dieses konnte anlässlich der "Internationalen Funkausstellung Berlin" (1983) – unter Beteiligung von Sala – der Öffentlichkeit präsentiert werden. Dieser Prototyp war noch nicht virtuos spielbar. Es folgten weitere Verbesserungen, um die dynamischen Eigenschaften der Manuale an die des Originalinstrumentes anzupassen. Im Januar 1988 wurde das optimierte Mixtur-Trautonium der Fachhochschule im Elektronischen Studio von Oskar Sala zur unentgeltlichen Nutzung aufgestellt.

5) Nebst den bisher bereits Genannten haben sich weitere Personen und Interessensgruppen konstruktiv mit dem Trautonium beschäftigt - unter ihnen die Doepfer Musikelektronik GmbH. Auf deren Website finden sich weitere interessante Details zur Funktionsweise und Schaltungstechnik des Trautoniums.⁴

2.2 Konstruktion

Prinzipiell besteht das Trautonium aus zwei Einheiten, der Steuereinheit (Manual) und der Klangerzeugungseinheit (Subharmonischer Generator).

Beim Prototyp des Urtrautoniums befand sich über einer Metallschneide eine gespannte und mit Widerstandsdraht umwickelte Saite, an die eine Glimmröhre zur Erzeugung sägezahnartiger Schwingungen angeschlossen war. Die Stelle, wo der Widerstandsdraht beim Spielen durch leichtes Andrücken die Schiene berührte, bestimmte als Funktion $R(l) \sim U$ die Tonhöhe. In der Weiterentwicklung kommen als Spielhilfe verschiebbare Metallzungen hinzu, die auf bevorzugte Intervalle wie Quinten und Oktaven einstellbar sind. Um akzeptable Klangbilder zu erzeugen sind ferner Elemente wie Filz- und Schwingungsdämpfer unerlässlich; dazu gehört auch eine verwindungssteife Bauweise des Manuals. Beim Mixturtrautonium kommen periphere Elemente für die Lautstärkesteuerung und zentral eine stattliche Anzahl elektronischer Signalverarbeitungsstufen hinzu.

³ http://www.subharchord.com/sub_frameset/Subharchord_Mai_2005/Subharchord_5-05_frontal.jpg
http://www.subharchord.com/sub_frameset/Subharchord_Mai_2005/Subharchord_5-05_innen.jpg

⁴ http://www.doepfer.de/traut/traut_d.htm

2.3 Schaltungstechnik

1) Die Lautstärke wird über einen von Sala entwickelten "Glyzerin-Widerstand" kapazitiv beeinflusst. Die vertikale Manualbewegung wird dazu über ein Gestänge an eine kleine Platte übertragen, die in ein mit Glyzerin gefülltes Gefäß eintaucht. Durch das Adhäsionsverhalten des Glyzerins ergibt sich ein spezielles Dynamikverhalten, mit dem eine nuancierte Lautstärkesteuerung im Pianissimo-Bereich möglich ist. Die Mixturen sind über Pedale (Fussregler) mit seitlich montierten Schaltern für beide Manuale getrennt umschaltbar.

2) Die Klangerzeugungseinheit bildet aus dem vom Manual stammenden variablen Gleichspannungspegel die entsprechenden Töne.

Blockschema des Mixturtrautoniums:

http://sites.google.com/site/futurephysics/Home/Mixturtrautonium_blockschaltbild.pdf

Der Tonumfang des Mixturtrautoniums beträgt $3\frac{1}{2}$ Oktaven. Die höchste Oszillatorfrequenz liegt bei 4 kHz (resp. $c_5 = 4186$ Hz), die tiefste bei 400 Hz (resp. $g_1 = 392$ Hz). Das Ausgangssignal des "Subharmonischen Generators" besteht aus 4 Sägezahnsignalen - den sog. Subharmonischen -, deren Frequenzen in einem ganzzahligen Verhältnis (1...24) zur gemeinsamen Master-Frequenz stehen.

Bekanntlich enthalten Sägezahnsignale ein reiches Obertonspektrum geradzahlig wie auch ungeradzahlig Harmonischer:

$$A(t) = \sin(\omega t) + \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot \omega t) + \dots + \frac{1}{n} \cdot \sin(n \cdot \omega t)$$

3) Signalmässig wird das von der betätigten Saite kommende DC-Signal als Tonhöhen-Steuerungsspannung einem Master-Oszillator (VCO) – sowie als Modifikation einem Nebenoszillator – zugeführt. Das aus dem VCO hervorgehende Tonsignal gelangt über einen einstellbaren Teiler auf einen Rechteck/Sägezahn-Wandler und von dort zu einem Kanalverstärker (VCA), der in der Regel von der vertikalen Position des Manuals gesteuert wird. Insgesamt sind vier voneinander unabhängige Frequenzteiler vorhanden, aus denen die Subharmonischen entstehen. Solche treten bekanntlich auch bei nichtlinearen Oszillatoren auf, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind. Bei einem maximalen Teilerfaktor von 24 ergibt sich im Beispiel eine niedrigstmögliche Frequenz von ca. 16 Hz. Von den Kanalverstärkern gelangen die derart geformten Signale auf die Formantfilter und von dort schliesslich zum Summenverstärker. Nach Bedarf können zudem ein Rauschgenerator und ein Schlagwerk zugeschaltet werden. Letzteres besteht aus zwei einfachen A/R-Hüllkurvengeneratoren, die auch selbstschwingend in der Art eines LFO's (Low frequency oscillator) betrieben werden können. Weitere schaltungstechnische Feinheiten sind den einschlägigen Beschreibungen im Netz zu entnehmen.