

## Kapitel 10: Elektronische Musikinstrumente

In diesem Kapitel verzichte ich auf die explizite Nennung von „Experimenten“. Alle hier erwähnten Instrumente und Klangerzeugungsverfahren werden im Kurs anhand von Ton- oder Videobeispielen demonstriert, sofern sie nicht live vor- oder durchgeführt werden.

Die elektrische/elektronische Übertragung, Speicherung, Verstärkung und Bearbeitung akustischer Information beruht auf der Tatsache, dass es möglich ist, mechanische Schwingungen „isomorph“ (= strukturgleich) in elektrische umzuwandeln und umgekehrt. Es gibt eine Reihe „unechter“ elektronischer Instrumente, bei denen eine mechanische Schwingung erzeugt wird, diese Schwingung aber erst aufgrund elektronischer Bearbeitung musikalisch brauchbar wird. Ein bereits besprochenes Beispiel ist die E-Gitarre und der E-Bass (Abbildung 3.1). Weitere Beispiele sind der 1930 erfundene **Neo-Bechstein-Flügel**, bei dem die Saiten wie beim mechanischen Hammerklavier erregt werden, die Saitenschwingung aber wie bei der E-Gitarre weiter verarbeitet wird. Bei der **Wurlitzerorgel** und beim heutigen Cembalett sind es akustisch kaum hörbare Metallzungen, deren Schwingung elektronisch bearbeitet werden.

### 10.1. Vorformen des Synthesizers

Es gab in der vordigitalen Zeit verschiedene Möglichkeiten, elektronische Schwingungen zu erzeugen:

- durch (elektrische) Kippschwingungen an Glühlampen,
- durch magnetisches „Abtasten“ rotierender Metallscheiben,
- durch elektrische Schwingkreise („in Eigenschwingung versetzte Radios“),
- durch Schwebungen zwischen hochfrequenten Schwingkreisen.

Teilungsfrequenzen			harmonische Obertöne:
1	1680 Hz	= 20 x 84 Hz	20 (=1680 Hz)
2	840 Hz	= 10 x 84 Hz	10 (= 840 Hz)
3	560 Hz	= 6,7 x 84 Hz	6 (= 504 Hz)
4	420 Hz	= 5 x 84 Hz	5 (=420 Hz)
5	336 Hz	= 4 x 84 Hz	4 (= 336 Hz)
6	280 Hz	= 3,3 x 84 Hz	3 (= 252 Hz)
7	240 Hz	= 2,9 x 84 Hz	
8	usw.		
10	168 Hz	= 2 x 84 Hz	2 (= 168 Hz)
11	usw.		
20	84 Hz	= 1 x 84 Hz	1 (= 84 Hz)

Kippschwingungen wurden 1924 im **Trautonium** verwendet. Die Sägezahnsschwingungen wurden dabei durch Filter verändert und durch „Teilungsschaltungen“ wurden die Frequenzen halbiert. Es entstanden höchst interessante „subharmonische“ Klänge, die nicht-ganzzahligen Obertonspektren glichen (zu hören in Hitchcocks „Die Vögel“, die Oskar Sala 1963 „vertonte“). Die Tabelle zeigt, was passiert, wenn man einen 20. Teilungston als Grundton interpretiert: die Teilungstöne 1 bis 19 erscheinen dann als teilweise sehr unharmonische „Obertöne“! 1995 hat Jörg Spix an der Universität Oldenburg die

Klangerzeugung des Trautoniums stilgetreu digital simuliert und das Ende der 80er Jahre wiederentdeckte aber unbezahlbare Instrument in greifbare Nähe von MusikinteressentInnen gerückt. (PLAY: 1. [Hindemiths Sonate für 3 Trautium's](#). 2. [Filmmusik zu „Die Vögel“ von Oscar Sala](#).)

Bei der **Hammondorgel** (erstmalig 1934/35 gebaut) wird die elektrische Schwingung dadurch erzeugt, dass sich eine rotierende Scheibe mit eingebuchtetem Rand an einem Tonkopf vorbei bewegt und dadurch eine Wechselspannung in der Spule des Elektromagneten erzeugt. Die Umdrehung des Rades wird von der Frequenz der Wechselspannung des Stromnetzes „synchronisiert“, die in den USA

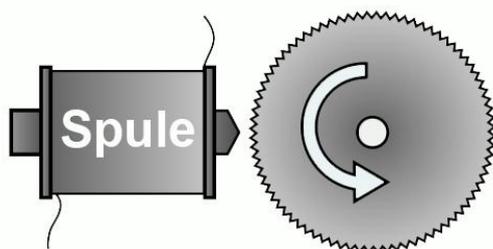


Abb. 10.1 Prinzip der Hammondorgel

60 Hz beträgt. Von einem Ausgangsrad (für den Kammerton 440 Hz) werden durch Übertragungsmechanismen 11 weitere „Frequenzen“ der temperierten Skala erzeugt. Bei einem gezackten Rad (Abbildung 10.1) entsteht eine sinusartige Schwingung, so dass die Hammondorgel sehr „ätherisch“ klingen kann. Eine Weiterentwicklung sind Versuche, das Zahnrad durch ein Rad zu ersetzen, das mit Schwingungsformen wertvoller Musikinstrumente (z.B. Orgeln) versehen ist.

Beim **Mellotron** bewegen sich bespielte Tonbandschleifen an Tonköpfen vorbei. Für jede Keyboard-Taste (bzw. Frequenz) wird ein mechanisches Rotationssystem (Scheibe, Tonbandschleife) benötigt, was das gesamte Instrument recht schwer und teuer macht. (PLAY: [Tonbeispiel Mellotron.](#))

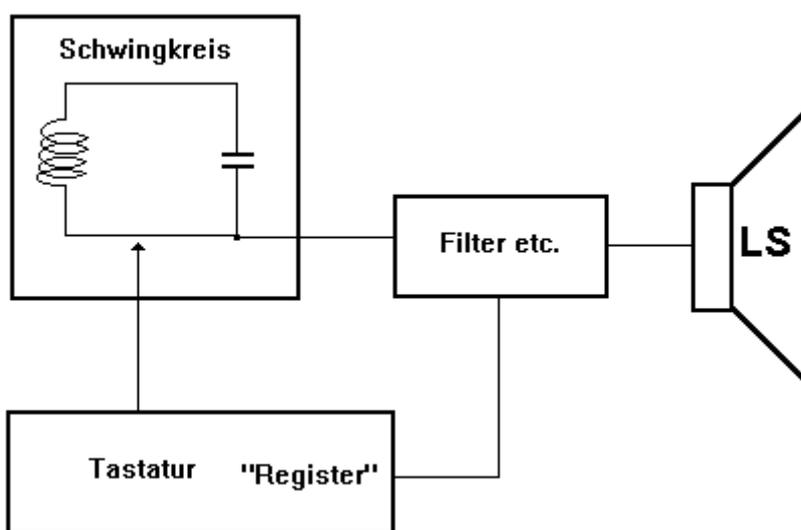


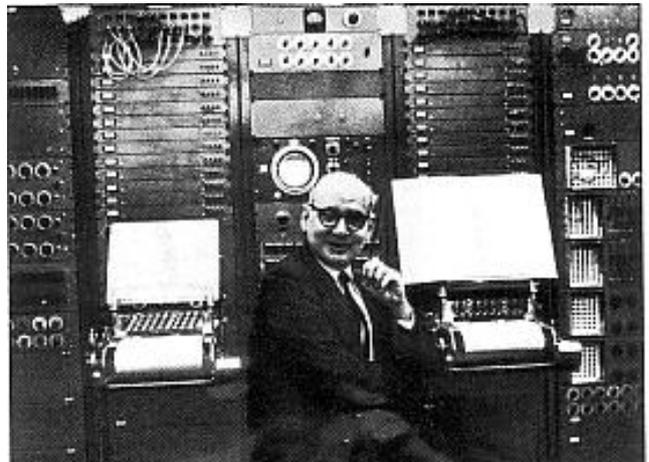
Abb. 10.2 Prinzip des E-Pianos/der E-Orgel

In **E-Pianos** (mit Ausnahme der bereits erwähnten Instrumente mit mechanischer Schwingungserzeugung) und **Elektronenorgeln** wird ein elektrischer Schwingkreis als Schwingungserzeuger verwendet. Ein solcher Schwingkreis erzeugt eine Wechselspannung, deren Frequenz dadurch verändert werden kann, dass eine der den Schwingkreis bildenden

Größen (Kapazität oder Induktion) von einer Tastatur aus verändert wird. Für mehrstimmiges Spiel muss es mehrere Schwingkreise geben, die gleichzeitig mit unterschiedlicher Frequenz schwingen können. Die Schwingungsform kann nachträglich durch elektrische Filter, Modulatoren, Verzerrer und ähnliches gestaltet werden. Solche Instrumente kommen den späteren Synthesizern schon sehr nahe, besitzen aber keine während des Spiels modulierbaren Klänge (Abbildung 10.2).

Noch heute in Gebrauch und neuerdings sogar mit Computer-Anbindung (über MIDI) erhältlich sind Instrumente, deren Tonfrequenz als Schwebung zweier hochfrequenter Schwingungen entsteht: Theremins **Ätherophon** (1921), Magers **Sphärophon** (1921) und die **Ondes Martenot** (1928). Der Mechanismus wurde anlässlich der Schwebungen beschrieben. Das Ondes Martenot wird heute vor allem in Frankreich noch gespielt und gebaut. Im Vorspann von „Raumschiff Enterprise“ ist es jeweils zu hören und Olivier Messiaen hat ihm in der „Turangalila Sinfonie“ die schönste Melodie des Stückes gewidmet. Sowohl Ondes Martenot als auch das beschriebene Trautonium können wie ein Saiteninstrument „kontinuierlich“ gespielt werden. Die für die Tonhöhenunterschiede zuständigen Änderungen des Schwingkreises werden dadurch hervorgebracht, dass ein Widerstandsdraht mit dem Finger mehr oder weniger verkürzt wird – die perfekte Nachahmung des Spiels einer Geige. Kein

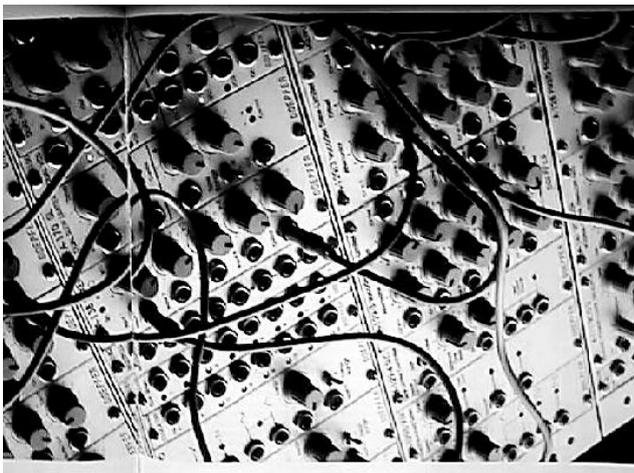
Wunder, dass sich der Bratschist Paul Hindemith (in der Abbildung 10.3 zusammen mit Oskar Sala) für dies Instrument begeistern konnte. (PLAY: [Ondes Martenot. Theremin-Vorführung](#)).



**Abb. 10.3** Trautoniumkonzert im Berliner Funkhaus. **Abb. 10.4** Milton Babbitt vor dem RCA-„Synthesizer“

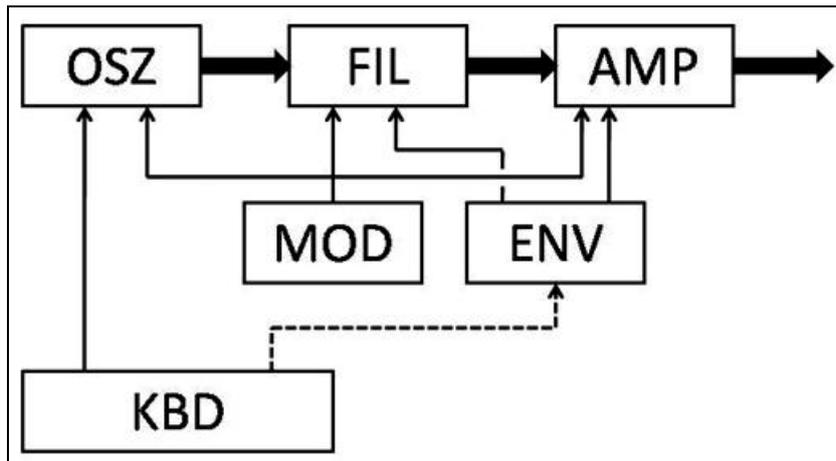
Die erste Phase elektronischer Musikinstrumente wird abgeschlossen durch „Synthesizer“, die noch ohne Spannungssteuerung arbeiten und im wesentlichen tonnenschwere Elektronenorgeln darstellen, die aber von Lochkarten als den Vorläufern von Computern gesteuert werden. Prototyp war der **RCA-Synthesizer** 1956. Durch die „automatische Steuerung“ konnten komplexere Kompositionen realisiert werden, so dass sich auch Avantgarde-Musiker für die Anlage am Columbia-Princeton Electronic Music Center interessierten. (Abbildung 10.4: Rechts und links die Schreibmaschinen zum Stanzen der Lochstreifen). (PLAY: [RCA-Synthesizer.](#))

## 10.2. Analoge Synthesizer



**Abb. 10.4** Moderner Nachbau eines modularen Analogsynthesizers (Doepfer)

Synthesizer unterscheiden sich von den früheren elektronischen („elektrischen“) Musikinstrumenten dadurch, dass der Klang während des Spiels verändert („moduliert“) und die Klangfarbe nicht nur durch „Presets“ abgerufen, sondern auch durch Aktivitäten von MusikerInnen „komponiert“ werden kann. Geburtsstunde des Synthesizers ist das Prinzip der „**Spannungssteuerung**“: alle Module (= Bauteile) eines Synthesizers können durch elektrische Spannungen gesteuert werden und erzeugen selbst elektrische Spannungen. Das bis heute gültige Grundschaltbild eines Synthesizers zeigt Abbildung 10.5:



OSZ = Oszillator  
 FIL = Filter  
 AMP = Verstärker  
 MOD = Modulator  
 ENV = Hüllkurvengenerator  
 KBD = Keyboard

dicke Pfeile = Audiosignale  
 normale Pfeile =  
 Steuerspannungen  
 gestrichelter Pfeil =  
 Triggerimpuls

Abb. 10.5. Funktionsschema eines Analogsynthesizers

## Die Bauteile

**OSZ** = Oszillator(en) als Schwingungserzeuger. Sie stellen meist einfache, obertoneiche „Grundschwingungen“ her (Rechteck, Sägezahn, Dreieck, Puls). Der Ausgang ist ein Audiosignal (Spannungsschwankungen im Millivoltbereich).

**FIL** = Filter unterschiedlichster Art. Sie lassen von der eingehenden Schwingung nur einen Teil der Obertöne durch. Es gibt drei wesentliche Filtertypen: Hochpass, Tiefpass und Bandpass, die je nach Bezeichnung nur hohe, tiefe oder Obertöne eines Frequenzbandes durchlassen.

**AMP** = Endverstärker, der die Amplitude des aus dem Filter austretenden Audiosignals steuert.

**MOD** = Modulator ist ein Oszillator, der mit niedrigen Frequenzen im Bereich zwischen 0,5 und 10 Hz schwingt. (Dies sind keine Tonfrequenzen, sondern Frequenzen, die als Tremolo, Vibrato etc. gehört werden können.) Ein von Hand betriebener Modulator ist das Pitchbend-Rad.

**ENV** = Der Hüllkurvengenerator ist dazu da, den zeitlichen Lautstärkenablauf zu steuern. Da dieses Bauteil in Verbindung mit der Spannungssteuerung das wichtigste innovative Bauteil eines Analogsynthesizers ist, wird es später ausführlich besprochen (Abbildung 10.9).



**KBD** = Keyboard/Tastatur. Diese Tastatur erzeugt bei Niederdrücken einer Taste eine Steuerspannung, die am OSZ eine Frequenz einstellt.

Die MS-Serie von Korg mit 4 Instrumenten (Synthi, Vocoder, Modulbank, Analog-**Sequencer**) hat das Fach Musik an der Universität Oldenburg im Jahr 1978 angeschafft.

Abb. 10.6 die Module des Analogsynthesizers Korg MS 10 (1978)

Zusammenhang zwischen Abb. 10.5 und 10.6 von links nach rechts:

- 2 spannungsgesteuerte Oszillatoren („voltage controlled oscillator“) mit Reglern für elementare Schwingungsformen, Oktaveinstellung, Feinstimmung. Darunter „Portamento“ und „Master Tune“ (Gesamtstimmung des Synthesis),
- 1 Mischer für die Signale der beiden Oszillatoren („vco mixer“). Darunter zwei Regler, die bestimmen, wie stark externe Steuerspannungen „wirken“ sollen (siehe später).
- 1 Hochpass und 1 Tiefpassfilter (hintereinander geschaltet ein Bandpass ergebend). Am Drehregler kann die „cutoff frequency“ eingestellt werden (siehe später). Unterhalb der beiden Filter Regler, die bestimmen, welche und in welcher Stärke diverse Modulatoren auf die Filter einwirken sollen.
- 1 Modulator (niederfrequenter Oszillator) mit Regler für die Frequenz und Schwingungsform.
- 2 Hüllkurvengeneratoren („envelope generator“) mit Reglern für alle Parameter, die eine Hüllkurve bestimmen (siehe später).
- Links unten das Pitchbend-Rad, daneben die ersten Tasten des Keyboards.

1964 hat Robert Moog das Prinzip der Spannungssteuerung entwickelt und damit den Synthesizer „erfunden“. Bei **Moog-Synthesizern** sind die Bauteile von Abbildung 10.5 als einzelne „Module“ ausgebildet, die durch Kabel miteinander verbunden werden. Derartige Modulsynthesizer werden auch heute noch produziert, da sie maximale Klangflexibilität aufweisen. Die Gesamtheit aller Einstellungen und Verbindungen der Bauteile eines solchen Modulsynthesizers stellt *eine* der unendlich vielen Klangfarben des Synthesizers dar. (PLAY: [Switched On Bach.](#))



Abb. 10.7 Das Patchboard des Synthesizers von Abbildung 10.6

Die Module des in Abbildung 10.6 teilweise dargestellten Synthesizers sind einerseits fest nach dem Schema von Abbildung 10.5 miteinander verbunden. Sie können andererseits aber auch durch externe Kabel (wie ein „echter“ Modul-Synthesizer) kreuz und quer miteinander verbunden werden, wie Abbildung 10.7 von der rechten Hälfte desselben Synthesizers zeigt.

## Das Konzept der Spannungssteuerung

Die Grundidee der Steuerspannung ist, dass jeder „Parameter“, der die Arbeit eines Moduls bestimmt, nicht nur „extern“ mittels Regler und Hand, sondern auch „intern“ durch eine elektrische Spannung verändert werden kann. Das heißt, dass jeder sichtbare „Regler“ auch unsichtbar durch elektrische Spannungen, die zwischen -5 und +5 Volt liegen, „gedreht“ werden kann.

Die wichtigsten Regelvorgänge sind folgende:

**KBD → OSZ** Jede Taste des Keyboards erzeugt eine elektrische Spannung, die am Oszillator die Frequenz und damit die Tonhöhe einstellt. Alles muss so konstruiert sein, dass im Normalfall eine temperiert-chromatische Skala möglich ist. Wird durch ein Zusatzpotentiometer diese Steuerspannung verändert, so kann die Skala gespreizt oder gestaucht werden ... und zwar vollkommen frei und kontinuierlich!

**MOD→OSZ** Die Frequenz des Oszillators wird „moduliert“. Erzeugt MOD eine Sinusschwingung von 5 Hz, so hört man ein ebenmäßiges Vibrato („Frequenzmodulation“).

**MOD→FIL** Die „Cut-Off-Frequenz“ des Filters und damit die Klangfarbe des Synthi-Klangs wird moduliert. Dieser Effekt ist ein genuiner Synthi-Effekt, da akustische Musikinstrumente kaum ein „Klangfarbenvibrato“ erzeugen können.

**MOD→AMP** Die Amplitude wird moduliert, so dass ein Tremolo entsteht (siehe Schwebung!).

**ENV→AMP** Der Hüllkurvengenerator erzeugt eine elektrische Steuerspannung von der Form einer „Hüllkurve“ (siehe später).

Die vom ENV erzeugte Steuerspannung öffnet und schließt den AMP gemäß der Hüllkurvenform. Der Hüllkurvengenerator sendet, wenn keine Taste gedrückt ist, keine Spannung, der AMP ist dann zu, man hört nichts von der Schwingung des OSZ. Erst wenn eine Taste gedrückt wird, sendet der Hüllkurvengenerator elektrische Steuerspannungen gemäß der Form der Hüllkurve an den AMP mit der Folge, dass dieser sich öffnet und die Schwingung von OSZ und FIL durchlässt.

**ENV→FIL** Die Hüllkurve kann nicht nur auf den AMP, sondern auch die Cut-Off-Frequenz des Filters einwirken. Dann wird die Klangfarbe „entlang der Hüllkurve“ moduliert. Dies ist **der** genuine Synthi-Effekt, der seit den 60er Jahren kontinuierlich die Elektronikszene – von „Switched On Bach“ über Jean Michel Jarres „Oxygen“ bis zu irgendeiner Live-Rave-Party heute – fasziniert hat. Denn in dieser Flexibilität kann nur ein Analogsynthi solch einen Sound herstellen, kein akustisches Instrument ist in der Lage, derart flexible Klangformung zu betreiben. (Am nächsten kommt dem Analogsynthi eines der ältesten Instrumente der Menschheit, das Didgeridoo der australischen Aborigines!!)

Wie schon erwähnt gibt es neben den Audiosignalen (hochfrequente Spannungen im Millivoltbereich) und den Steuerspannungen (niederfrequente oder einmalige Spannungen von +/- 5 Volt) noch sog. Triggerspannungen oder Triggerimpulse, die den ENV „starten“ (gestrichelter Pfeil in Abbildung 10.5). Einen solchen Triggerimpuls sendet das Keyboard, sobald eine Taste gedrückt wird.

### **Klangformung am Analogsynthi oder der analoge „Kult-Sound“**

An einem Beispiel wird das Entstehen eines Analogsynthi-typischen Klangs erläutert. (1) Bevor eine Keyboardtaste gedrückt wird steht der AMP auf 0, weil er vom ENV keine Steuerspannung erhält, weil dieser vom KBD noch keinen Trigger empfangen hat. Der OSZ schwingt seit Einschalten des Geräts in Ruhelage vor sich hin... ungehört. (2) Sobald eine Taste gedrückt wird, sendet KBD eine Steuerspannung an OSZ, die dort die der Taste entsprechende Frequenz einstellt. Zugleich sendet sie einen Trigger an ENV, so dass dieser anfängt, seine Hüllkurven-Steuerspannung zu senden. (3) Im weiteren Verlauf, solange die Taste des KBD nieder gedrückt ist, öffnet sich AMP gemäß der Hüllkurve von ENV, man hört die von FIL verarbeitete Schwingung des OSZ als Ton. Zugleich jedoch verändert die Hüllkurven-Steuerspannung von ENV auch die Cut-Off-Frequenz des FIL. Dadurch ändert sich die Klangfarbe. (4) Wird die Taste des KBD losgelassen, so lässt die Hüllkurven-Steuerspannung je nach Einstellung der sog. Release-Zeit langsam nach, der AMP schließt sich (der Ton verklingt) *und* die Cut-Off-Frequenz des FIL wird wieder „zurück gestellt“.

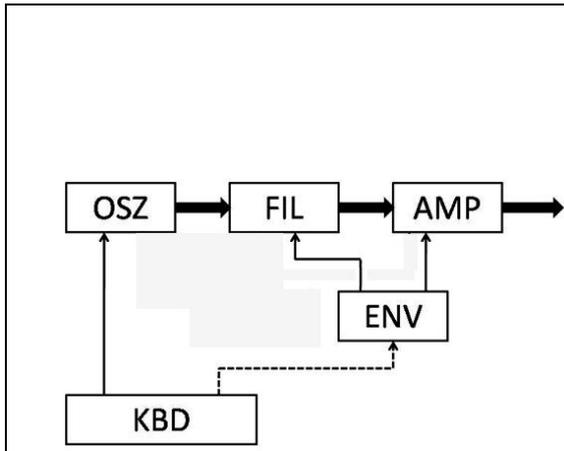


Abb. 10.8 Schema des Synthesounds

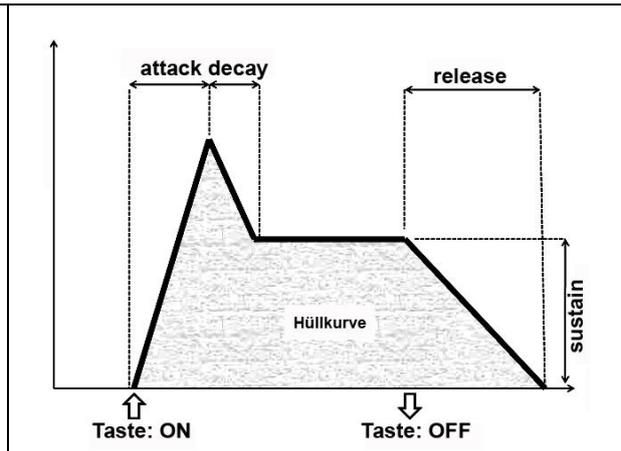


Abb. 10.9 Die Hüllkurvenparameter

Um den musikalischen Effekt dieses im Prinzip einfachen, musikhistorisch jedoch revolutionären Vorganges nachvollziehen zu können, hier eine genauere Erklärung der Parameter einer klassischen Hüllkurve (die heute jeder Computer in seiner Soundcard fest eingepreßt hat): Die Hüllkurve steht auf Null, wenn kein Trigger eintrifft. Trifft ein Trigger ein (Pfeil 1), so startet die Hüllkurve mit dem Einschwingvorgang („attack“), dem ein Abfallen („decay“) auf den Dauerzustand mit einem bestimmten Level („sustain“) folgt. Trifft der Trigger „Taste wird losgelassen“ ein (Pfeil 2), dann beginnt die Ausschwingphase („release“) der Hüllkurve. – Die Hüllkurve spiegelt also die Grunderscheinungsformen eines Instrumentalklanges wider.

Was hört man? Beim Drücken der Taste öffnet sich während der attack-Zeit der Filter von tief nach hoch, bei entsprechender Einstellung entlang den Formantbereichen von U→O→A, es entsteht ein „Wah“ und die Klangfarbe geht dann, je nach sustain-Stellung auf eine Vokalfarbe zwischen A und O zurück. Beim Loslassen der Taste klingt der Sound nach, von O→U (oder noch „tiefer“). Jean Michel Jarre läßt grüßen! Mit diesem Vorgang und ein bisschen Humor hat er Millionen gemacht.

### Weiterentwicklungen



Abb. 10.10 Einer der ersten mehrstimmigen Analogsynthesizer

**Mehrstimmigkeit.** Synthesizer, die nach dem Schema von Abbildung 10.5 arbeiten, sind einstimmig. Seit 1978 gibt es mehrstimmige Instrumente, die mehrere einstimmige Synthesizer integrieren, deren Verstärker je nach Anzahl gedrückter Tasten zugleich aktiviert sind. Ein kleiner Rechner muss dafür sorgen, dass neu gedrückte Tasten gegebenenfalls früher geöffnete Verstärker stummschalten. Abbildung 10.10 zeigt den 8-stimmigen Synthesizer aus dem *Oldenburger TechnoMuseum* (siehe Kapitel 11.5) mit dem Namen „Mono/Poly“ von Korg. 1982 kamen dann elegantere Synthesizer auf den Markt, die die internen Komplikationen der analogen Mehrstimmigkeit auf kleinen Platinen verstecken .

**Speicherung der Einstellungen.** Seit 1982 kann die Gesamtheit aller Einstellungen des Modulsystems digital gespeichert und auf Knopfdruck wieder abgerufen werden. Damit ist es möglich, verschiedene Klangfarben schnell zu reproduzieren. Der „Programm“-Speicherinhalt kann auch extern gespeichert werden. Bei den ersten Geräte geschah dies dadurch, dass die einschlägigen PCM-Signale (vergleiche Kapitel 4.4) analog-akustisch auf eine Musikcassette übertragen wurden. Die „Programmspeicherung“ setzte voraus, dass die Stellungen

sämtlicher Regler eines Modul-Synthesizers in Form von Zahlen vorliegen. Und umgekehrt, dass die Regler durch „Empfang“ von Zahlen „eingestellt“ werden können. Da die Regler spannungsgesteuert waren, war dies nicht schwierig: Zahlen wurden in elektrische Spannungswerte umgesetzt und umgekehrt. Damit war der *erste* Schritt zur Digitalisierung technisch vollzogen. („MIDI“ ist ein 1983 normiertes System solcher Zahlen, die die Einstellungen der Regler und Tasten eines Synthesizers wiedergeben.)

**Midifizierte Analogsynthesizer.** In den 90er Jahren wurden, nachdem der technische Fortschritt die analogen Synthesizer zunächst vom Markt gefegt hatte, die Analog-Sounds wieder entdeckt. Nun mussten analoge Bauteile so konstruiert werden, dass man sie von Computern aus ansteuern konnte. Dies geschah durch sog. Midifizierung. Computer können MIDI-Daten senden (siehe später) und die analogen Module müssen diese „verstehen“. So muss ein MIDI-Event für die Taste des Tons a' im Oszillator die Frequenz 440 Hz einstellen. Die in München angesiedelte Firma Doepfer hat kontinuierlich analoge Synthi-Module gebaut und war daher zuerst auch führend in der Herstellung computer-gesteuerter Analog-Synthesizer. Abbildung 10.11 zeigt ein solches Gerät aus dem *Oldenburger TechnoMuseum*. Die Bauteile OSZ, MOD, FIL, AMP, ENV mit ihren (analogen) Reglern sind gut zu erkennen. Alle diese Regler können nicht nur von Hand, sondern auch vom Computer aus gesteuert werden. Diese Steuerung kann jeder Midi-Sequencer erledigen, es bedarf keines besonderen Programms.



Abb. 10.11 Midifizierter Analogsynthi aus der „Analog-Kultzeit“ (1990er Jahre)

### 10. 3. Digitale Synthesizer

Der nächste Schritt zur Digitalisierung von Synthesizern erfolgt dadurch, dass auch die Schwingungserzeugung und -verarbeitung digitalisiert wird. Der **Oszillator** wird durch einen Mini-Soundsampler ersetzt: die Schwingungsform liegt als Zahlenfolge vor, die von einer „Uhr“ ausgelesen wird. Während ein analoger Oszillator sowohl eine strikte Periodizität einhalten als auch eine konstante Schwingungsform abgeben musste, werden diese beiden Aufgaben nun auf zwei Teile aufgeteilt: die „Uhr“ hat für die konstante Abtastrate („Periodizität“ bzw. Frequenz) zu sorgen, der Speicherinhalt („Zahlenfolge“) stellt die fixe Schwingungsform dar. Es gibt zwei Möglichkeiten, wie das Instrument mit dieser Zahlenfolge umgeht:

- Der „Oszillator“ enthält selbst einen D/A-Wandler und gibt an seinem Ausgang analoge Wechselspannungen ab, die wie im Analogsynthesizer verarbeitet werden (z.B. beim „Juno 106“ des *Oldenburger TechnoMuseums*).
- Der „Oszillator“ gibt seine Zahlenfolge an (digitale) Filter, einen digitalen Verstärker und digitale Effektgeräte ab, an die sich der D/A-Wandler anschließt (z.B. bei der Workstation „Korg M1“ des Instituts für Musik in Oldenburg).

Es wurden im Laufe der 80er Jahre unzählige mehr oder minder erfolgreiche Methoden entwickelt, wie die Zahlenfolgen in den „Oszillator“ hineinkommen: von Hand geschrieben oder gezeichnet, aus

akustischen Instrumentklängen abgeleitet, mittels Algorithmen errechnet usw. Im Extremfall enthielt der „Oszillator“ komplette Instrumentensamples, sodass der Synthesizer faktisch ein mit Filtern und Modulationswerkzeugen versehener Soundsampler (wie in Kapitel 4.5 beschrieben) war. Seit 1997 sind Mischformen derartiger Sampler mit „reinen“ Synthesizern marktbestimmend. Jede GM-Soundcard eines Computers enthält heute faktisch eine solche, mehr oder minder fest eingetragene Struktur.

### FM-Synthese als rein-digitale Klangerzeugung

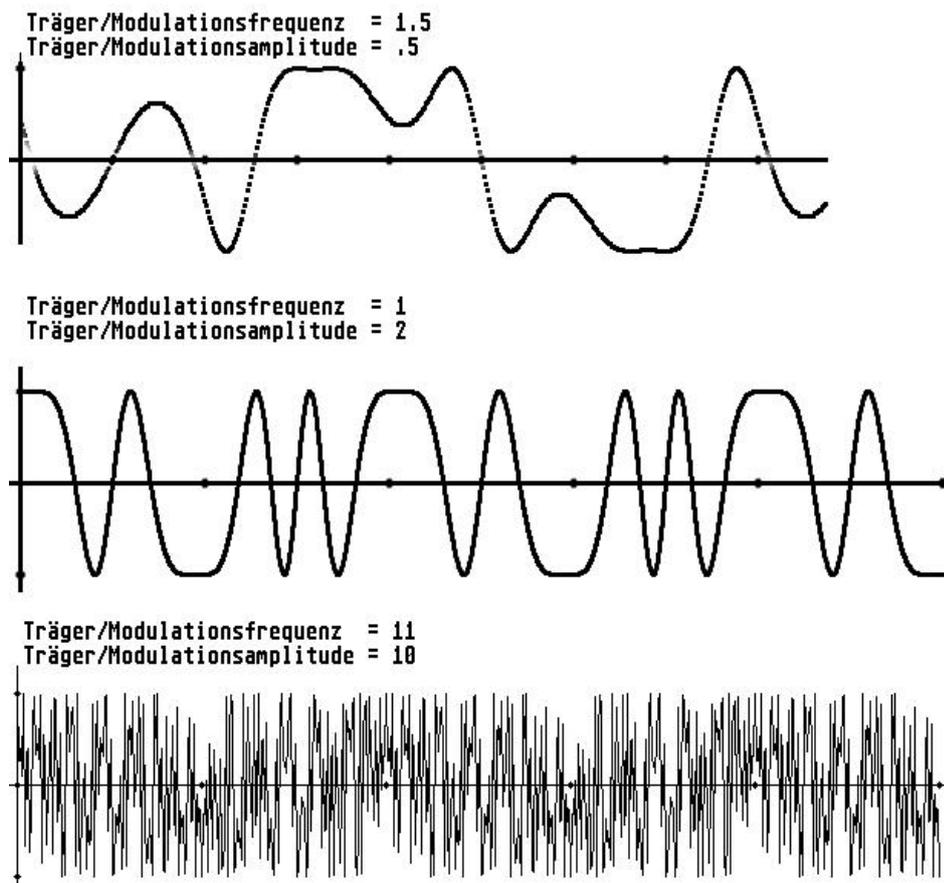


Abb. 10.12 Die FM-Synthese

Ein gravierendes Problem rein-digitaler Synthesizer ist die Tatsache, dass die digitale Simulation analoger Filter musikalisch nicht überzeugend ist. Deshalb klingen digitale Filter anders - und nach Meinung vieler MusikerInnen „schlechter“ - als analoge. Die eleganteste und radikalste Lösung des „Filter-Problems“ hat die Firma Yamaha 1983 mit dem viele Jahre hindurch weltweit meistverkauften Synthesizer „DX 7“ auf den Markt gebracht. In diesem

Synthesizer gibt es nur Sinus-Oszillatoren und gar keine Filter. Die Oszillatoren können sich gegenseitig frequenzmodulieren: die Schwingung eines als „Modulator“ bezeichneten Oszillators verändert die Frequenz eines anderen mit „Träger“ bezeichneten Oszillators (**FM-Synthese**). Ist die Modulatorfrequenz sehr klein, zum Beispiel 5 Hz, so erzeugt der Träger ein Vibrato. Ist die Modulatorfrequenz aber hoch, zum Beispiel 1000 Hz, so erzeugt der Träger eine kompliziert aus Seitenbändern aufgebaute Schwingung, die eine äußerst eigentümliche Form und damit Klangfarbe hat. Abbildung 10.12 zeigt einige Beispiele. Derartige Schwingungskurven gab es noch nie – weder bei akustischen noch analog-elektronischen Instrumenten! Das Ohr bekam etwas ganz Neues zu hören und reagierte mit bekannten Assoziationen an Glockenklänge, Rauschen, „harte“ Analogklänge usw.

Eine musikalisch befriedigende FM-Synthese war technisch nur möglich mit digitalen und miteinander koordinierten Oszillatoren. Theoretisch können sich über Steuerspannungen auch die Oszillatoren analoger Synthesizer frequenzmodulieren, das Ergebnis ist jedoch ein chaotisches Knurren, da die analogen Oszillatoren nie wirklich synchron arbeiten. Das Aufeinander-Einwirken der Oszillatoren bei der FM-Synthese ist ein rein mathematischer Vorgang, weshalb des Schaltschema

eines Klages auch „Algorithmus“ genannt wird. Die FM-Synthese wird daher auch (logisch nicht korrekt) „**digitale Klagsynthese**“ bezeichnet. (PLAY: [Klangbeispiel vom DX 7.](#))

*Zusammenfassung der FM-Innovationen:*

- Einfachste Module führen zu komplexen Klängen (es genügen 2 Sinusoszillatoren ohne Filter).
- Es entstehen Schwingungsformen, die kein anderes Instrument erzeugen kann.
- Es ist möglich, Klänge zu erzeugen, die an Glocken, Gongs etc. erinnern oder geräuschhafte Einschwingvorgänge simulieren (Hammerklavier, Funk-Gitarre usw.).
- Die Klagerzeugung ist für viele Musiker/innen nicht mehr durchschaubar. Es entsteht das trial-and-error-Prinzip beim Sound-Design.

Ein einfacher und preiswerter FM-Sound-Chip ist Bestandteil jeder Soundcard und wird für all jene Klänge eingesetzt, die nach „typisch Computer“ klingen sollen (vor allem bei Computerspielen).

## Physical Modeling

Zwischen dem Funktionsschema OSZ→FIL→AMP eines Analog-Synthesizers (Abbildung 10.5) und der Funktionsweise der menschlichen Stimme (Vokallaute) besteht große Übereinstimmung

Stimmbänder → Mund-Rachenraum → Lunge/Zwerchfell – Abstrahlung

Auf ähnliche bzw. erheblich verfeinerte Weise werden beim Physical Modeling Funktionsschemata für andere akustische Instrumente entwickelt. Ein physikalischer Modellierer muss daher zunächst ein Modell der Klagerzeugung eines akustischen Instruments entwickeln, das möglichst alle Feinheit von Klangfarbe, Artikulation und Klangcharakter beinhaltet, um sodann dies Modell in ein Computer-Design zu überführen. 1994 ist am Beispiel der Klarinette, deren Klagerzeugung bis dahin wissenschaftlich recht umstritten war (vgl. Kapitel 7), ein Modell entwickelt worden, das zu erstaunlich guten Klagsimulationen geführt hat (Abbildung 10.13). Als Grundmoduln wird Mundstück, Rohr und Schalltrichter gewählt. Das Mundstück wird als nichtlinearer Oszillator betrachtet, der seine Schwingung ans Rohr abgibt, zugleich aber von rücklaufenden Schwingungen aus dem Rohr beeinflusst wird. Die stehende Welle im Rohr wird durch eine hinlaufende und eine rücklaufende Welle dargestellt. Letztere enthält überwiegend tiefe Frequenzen der Originalschwingung und ist invertiert. Nach Außen dringt ein mit Hochpass leicht gefiltertes Audiosignal.

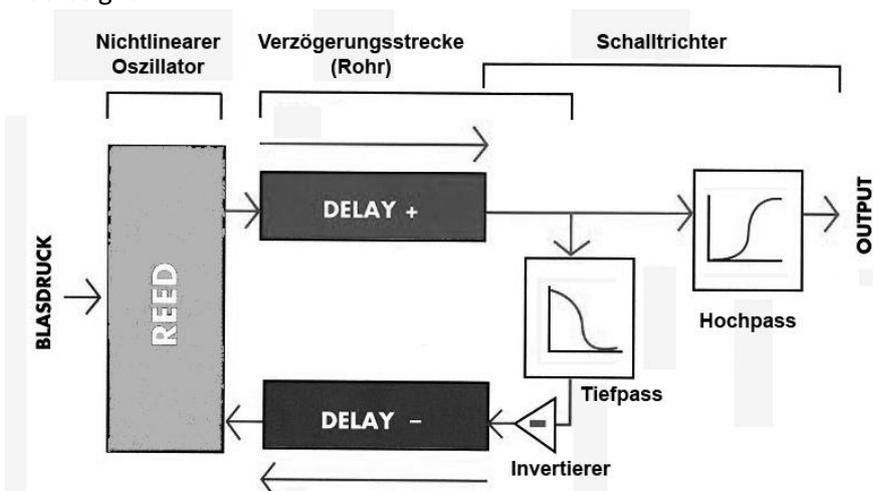


Abb. 10.13 Modell der Klarinette

Alle hier vorkommenden Parameter („Blasdruck“ = Amplitude des nichtlinearen Oszillators, Intensität und Klangfarbe der rücklaufenden Welle, Verzögerung im Rohr hin und zurück, Hochpassfilter etc.) können beliebig variiert werden. Bei gewissen Einstellungen erhält man einen Klarinettenklang, bei anderen jedoch kann man vollkommen neue Klänge erzeugen. (PLAY: [Saxophon](#) und [E-Gitarre](#) nach PM.)

Klänge erzeugen. (PLAY: [Saxophon](#) und [E-Gitarre](#) nach PM.)

## Granularsynthese und Resynthese

Das Physical Modeling setzt große Rechnerleistungen voraus, um flexibel „spielbar“ zu sein. Eine andere zunächst spielerisch anmutende Art, den Computer neue Klänge aus alten herstellen zu lassen, hat sich aus einer „Miniaturisierung“ des Sampling ergeben. Wählt man aus einem Originalklang, der als Audiodatei (beispielsweise als wav-Datei) vorliegt, kleine Teile („grains“) aus, klebt diese Teile neu zusammen, so erhält man – traditionell gesprochen – eine Collage. Granularsynthese ist eine solche, auf die Spitze getriebene Collage. Die herausgegriffenen Teile sind sehr klein und die Collage ist dadurch enorm fein gestrickt. Sind die Teile unter 5 ms, so wird die Collage als neue Klangfarbe wahrgenommen.

Die Art der Collage ist vielfältig, sie kann auch mehr-dimensional angelegt sein. Curtis Road spricht von „Wolken“. Die Klangergebnisse sind kaum vorhersehbar und bieten damit Klangexperimentatoren einen großen Handlungsspielraum.

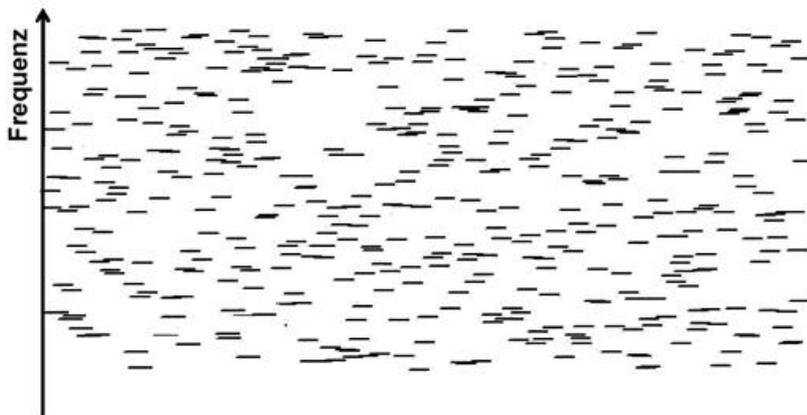


Abb. 10.14 Klangwolke einer Granularsynthese

**Resynthese:** Die Klangerzeugung am Analog-Synthesizer wird „Subtraktive Fouriersynthese“ genannt, weil hier einer obertonreichen Oszillatorschwingung durch die Filter Obertöne weggenommen werden. Das Gegenstück ist die „Additive Fouriersynthese“, bei der Obertöne

systematisch zusammengesetzt werden. Dies Verfahren ist musikalisch dann einigermaßen befriedigend, wenn man wirklich sehr viele (mindestens 32) Obertöne „addieren“ und die Art der Addition moduliert werden kann. Das Letztere bedeutet, dass es möglich sein muss, im Verlauf eines Klanges – wie dies bei akustischen Instrumenten der Fall ist – die Amplituden der einzelnen Oberschwingungen zu verändern.

Die Resynthese ist das diesbezüglich eleganteste Verfahren, da es sowohl zur Generierung elektronischer Klänge als auch zur „Verbesserung“ vorgegebener Klänge eingesetzt werden kann. Wie der Name sagt wird in einem ersten Schritt ein beliebiger digital gespeicherter Instrumentalklang in sehr kleinen Zeiteinheiten (siehe oben „grains“) nach Fourier analysiert. Was nicht „obertonrein“ ist, bleibt unberücksichtigt. Im 2. Schritt kann die Amplitude jeder einzelnen Oberschwingung verändert werden – und das in kleinsten Zeitfenstern. Im 3. Schritt werden die modifizierten Fenster wieder zusammengesetzt. Ersichtlich kann man mit diesem Verfahren eine Stimme (mit wenig Tiefen) oder eine Geige (mit wenig „Stradivari-Formanten“) aufmöbeln. Man kann aber auch synthetische Klänge mit vagen Erinnerungen an den Originalklang erzeugen. (PLAY: [Resynthese.](#))

*Zusammenfassung: Wann ist ein Synthesizer digital?*

- Schwache Form: analoge Bauteile werden durch digitale ersetzt. Im Falle der Oszillatoren sind hier mehr Flexibilität und Kontrollierbarkeit die Folge, im Falle der Filter ein Qualitätsverlust.
- Mittelstarke Form der Digitalisierung: die digital simulierten ehemals analogen Bauteile sind von Computern aus steuerbar („Midifizierung“) und die Klangparameter können wie Computerdaten behandelt werden.

- Starke Form der Digitalisierung: die Klangerzeugung ist nicht-analog, nicht-simuliert sondern vollkommen eigenständig und nur auf digitalem Weg (Stichwort „algorithmisches Sound-Design“) möglich. FM-Synthese und Physical Modeling waren hierfür zwei herausragende Beispiele.

Doch wie's da drin aussieht...

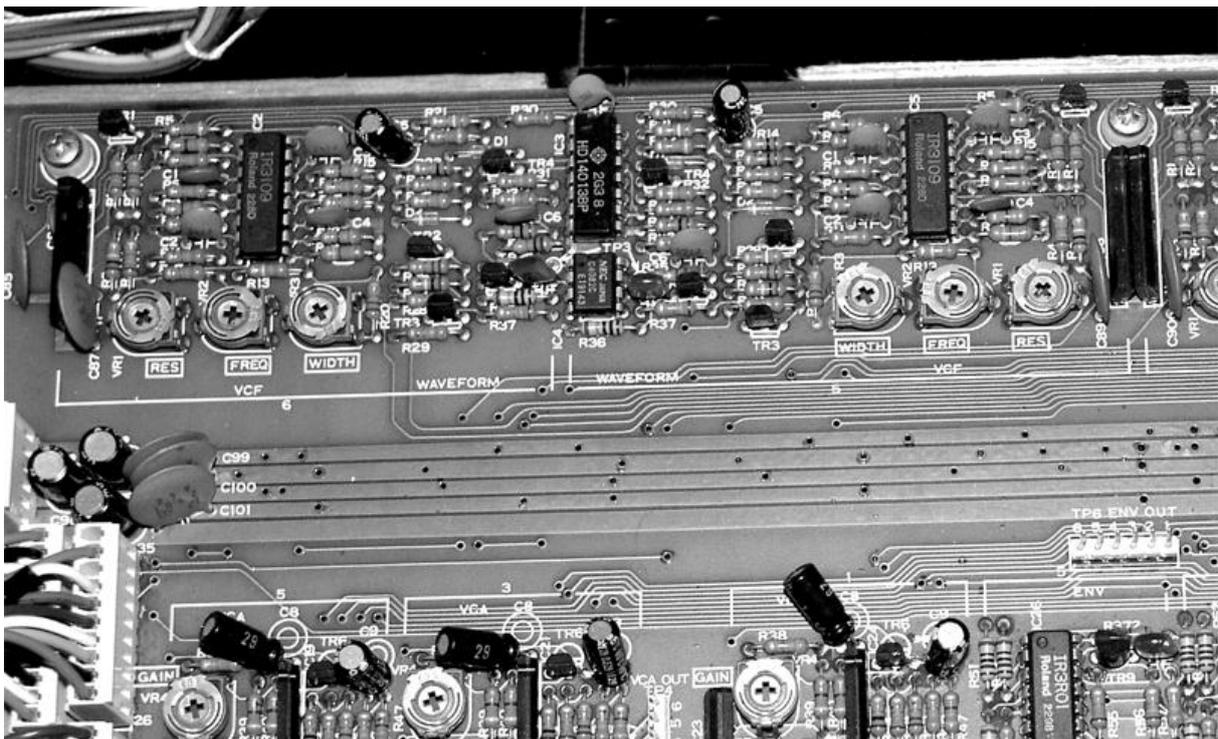


Abb. 10.14 Wie viele Stimmen hat dieser „Juno 60“ von Roland? Und aus welcher Operette ist das Zitat der Überschrift und wie geht der Satz weiter – und: stimmt er?