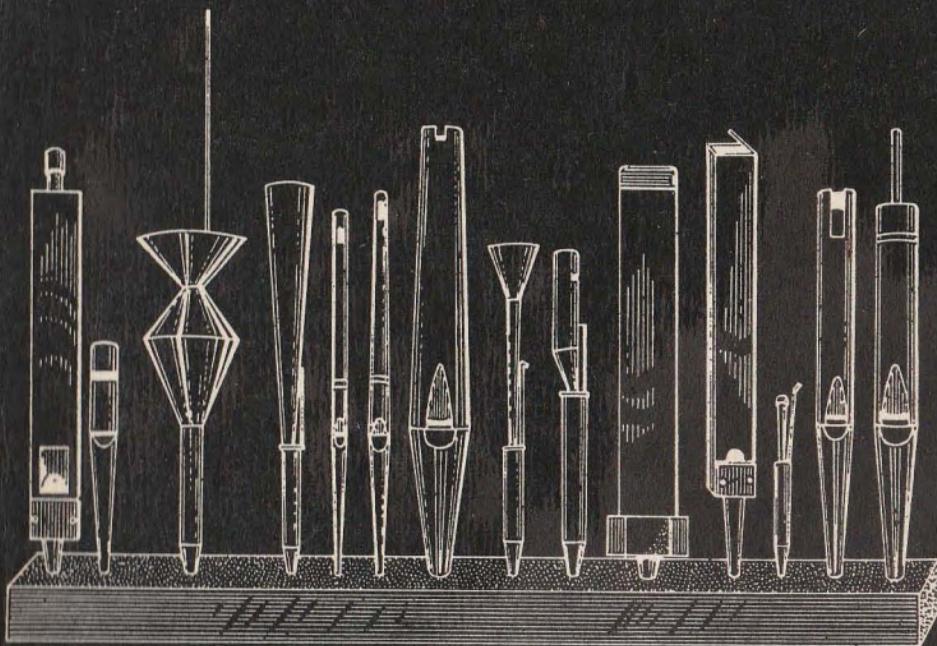


amateurreihe

# electronica



**Georg Engel**

**Elektromechanische und voll-  
elektronische Musikinstrumente  
Teil 1**



electronica · Band 132

**Elektromechanische und voll-  
elektronische Musikanstrumente,**

**Teil 1**



GEORG ENGEL

# **Elektromechanische und vollelektronische Musikinstrumente**

Teil 1: Technisch-musikalische Einführung



MILITÄRVERLAG  
DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN  
REPUBLIK

1. Auflage, 1975, 1.-15. Tausend

© Militärverlag

der Deutschen Demokratischen Republik (VEB) - Berlin, 1975

Cheflektorat Militärliteratur

Lizenz-Nr. 5

LSV 3539

Lektor: Dipl.-Phys. Hans-Joachim Mönig

Zeichnungen: Gudrun Maraun

Typografie: Helmut Herrmann

Hersteller: Ingeburg Zoschke

Vorauskorrektor: Johanna Pulpit

Korrektor: Ingeborg Kern

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: Druckerei Märkische Volksstimme Potsdam

Redaktionsschluß: 15. August 1974

Bestellnummer: 745 695 3

EVP 1,90 Mark

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	8
1. Allgemeine und technisch-musikalische Einführung .....	10
2. Töne und Klangfarben mechanischer Musikinstrumente und die Elektroakustik .....	13
2.1. Verschiedenartige mechanische Musikinstrumente .....	17
2.1.1. Monophone mechanische Instrumente mit im Prinzip nicht veränderlichem Klangcharakter .....	17
2.1.2. Polyphone mechanische Instrumente mit nicht regelbarer Klangbildung .....	18
2.1.3. Polyphon spielbare mechanische Instrumente mit einstellbarem Klangspektrum .....	18
2.2. Klangfarbenbildung bei Kino- und Konzertorgeln mit Pfeifen und ihre Bedeutung für elektroakustische Musikinstrumente .....	19
2.3. Ton- und Klangfarbenerzeugung bei elektroakustischen Musikinstrumenten .....	32
3. Elektroakustische Musikinstrumente .....	40
3.1. Elektromechanische Instrumente .....	40
3.1.1. Polyphon spielbare elektromechanische Instrumente .....	41
3.1.2. <i>Hammond</i> - und Lichttonorgeln .....	42
3.2. Vollelektronische Instrumente .....	44
3.2.1. Monophone Instrumente mit elektronischer Tonerzeugung .....	44
3.2.2. Vollelektronische Polyphone und elektronische Orgeln .....	45
3.2.2.1. Kleine Polyphone mit mehreren Registern in gleicher Tonlage .....	48

3.2.2.2. Große Polyphone mit Registern in mehreren Tonlagen .....	49
3.2.2.3. Elektronische Orgeln .....	51
4. Vorzüge und Nachteile elektroakustischer Musikinstrumente .....	55
5. Normen im Musikanstrumentenbau .....	59
6. Technische Grundkenntnisse zum Verständnis des Aufbaus und der Wirkungsweise elektroakustischer Musikanstrumente .....	61
6.1. Übersichtsschaltpläne einfacher Instrumente	62
6.2. Elektromechanische Systeme zur Tonerzeugung .....	70
6.2.1. Elektromagnetische Systeme .....	70
6.2.2. Elektrodynamische Systeme .....	72
6.2.3. Piezoelektrische Systeme .....	73
6.2.4. Elektrostatische und fotoelektrische Abtastsysteme .....	74
6.3. Grundschaltungen elektronischer Tongeneratoren .....	74
6.4. Klaviaturen und Tonfrequenzschalter .....	81
6.5. Prinzipielle Schaltungen zur Klangformung ..	86
6.5.1. Prinzipschaltungen für die additive Klangbildung .....	86
6.5.2. Prinzipschaltungen für selektive Klangbildung	90
6.5.3. Erzeugung klanglicher Effekte .....	91
6.6. Lautstärkeregelung .....	95
6.7. Vorverstärker .....	97
6.8. Leistungsverstärker und Lautsprecher .....	98
6.9. Stromversorgung .....	103
7. Schlufsbetrachtungen .....	105
Literaturverzeichnis .....	107
Bildnachweis .....	109

Die Teile 2, 3 und 4 enthalten folgende Hauptabschnitte:

Teil 2: Der mechanische und elektrische Gesamtaufbau kleiner und großer Instrumente

8. Praktische Versuche
9. Beispiele des Gesamtaufbaus elektromechanischer und vollelektronischer Musikinstrumente
- Teil 3: Der spezifische Aufbau von Baugruppen und Instrumenten
10. Schaltungs- und Aufbauvarianten von Baugruppen und Instrumenten
11. Verdrahtung der Baugruppen
- Teil 4: Bauanleitungen
12. Gehäusegestaltung
13. Hinweise zum Selbstbau eines elektronischen Musikinstruments
14. Selbstbaupraxis
15. Beispiele des Entwurfs verschiedener Instrumente
16. Bauvorschlag für ein klangschönes Polyphon
17. Bauanleitungen
18. Möglichkeiten nachträglicher Erweiterungen
19. Erfahrungen aus der Reparaturpraxis
20. Entwicklungstendenzen im elektronischen Musikinstrumentenbau
21. Ergänzungen

## **Vorwort**

Elektroakustische Musikinstrumente sind wegen ihrer guten klanglichen Eigenschaften sehr beliebt. In Tanz- und Unterhaltungsorchestern, aber auch beim häuslichen Musizieren haben sie sich bereits einen festen Platz unter den Instrumenten erobert. Zum häuslichen Musizieren werden Polyphone bevorzugt.

Vom Aufbau und von der Wirkungsweise der Instrumente ist hingegen wenig bekannt. Ein größerer Kreis von Fachleuten, Amateuren und Musikern möchte gern Näheres über *elektroakustische Musikinstrumente* erfahren. Diesem Wunsch entspricht der Verlag mit der Herausgabe der 4 Broschüren.

Die ersten Abschnitte enthalten das Grundwissen über elektromechanische und vollelektronische Musikinstrumente. Weiterhin werden Informationen über den komplexen Aufbau elektronischer Musikinstrumente gegeben, und der Leser wird an technische Einzelheiten herangeführt.

Interessenten am Selbstbau eines Instruments erhalten Hinweise und Anleitungen für den Entwurf und Eigenbau von Polyphonen und elektronischen Orgeln. Es werden Erfahrungen aus jahrelanger praktischer Tätigkeit vermittelt und Vorversuche beschrieben.

Die letzten Abschnitte des Themas beschäftigen sich speziell mit der Bauplanung für ein Polyphon, das höheren Ansprüchen bei der Interpretation von Tanz- und Unterhaltungsmusik gerecht wird, und geben auch über den Selbstbau größerer elektronischer Orgeln Aufschluß.

Polytechnisch vorgebildeten Lesern wird es nicht schwerfallen, tief in die Materie einzudringen. Fachleute auf dem Gebiet der Elektronik sollten die Gelegenheit nutzen, sich ein neues Spezialgebiet zu erarbeiten. Sie erlangen damit eine erwünschte Qualifikation in ihrem Fach, denn der Be-

darf an Servicetechnikern für elektronische Musikinstrumente wird immer größer.

Die Schwerpunkte der Erläuterungen beziehen sich auf Polyphone, die mit den Instrumenten der *Matador*- und *Ionika*-Serien vergleichbar sind. Auf diese bauen die Ausführungen bis zu großen elektronischen Orgeln auf. Instrumente dieser Art sind gut für den Selbstbau geeignet, da vorwiegend bekannte elektronische Grundschaltungen angewendet werden. Ferner kann sich jeder Leser dieser Broschüre noch zusätzlich in der Fachliteratur informieren und sein Wissen vertiefen. Auf geeignete Quellen wird jeweils hingewiesen.<sup>1</sup>

Elektronische Polyphone sind arbeitsintensive Erzeugnisse. Der Anschaffungspreis industriell hergestellter oder handwerklich gefertigter Instrumente liegt daher je nach Größe und Ausführung hoch. Beim Selbstbau betragen die Materialkosten nur zwischen 25 % und 30 % des Verkaufspreises von Industrieerzeugnissen, wenn preisgünstig angebotenes Bastelmaterial verwendet wird.

Dem großen Arbeitsaufwand beim Selbstbau eines Polyphons stehen jedoch die Entspannung beim Basteln und die Freude am geschaffenen Werk gegenüber. Amateure werden viel Lob und Zuspruch erhalten, wenn sie ihr erfolgreich fertiggestelltes Instrument vorführen, denn erfahrungsgemäß übertrifft es mit seinen Eigenschaften alle Erwartungen.

Den Freunden von elektroakustischen Musikinstrumenten sei viel Erfolg zu ihrem Vorhaben beschieden, sich beim Lesen der Lektüre neues Wissen anzueignen. Sicher werden viele mit dem Bau eines Instruments beginnen, um die Theorie in der Praxis anzuwenden und zu überprüfen. Die Bestätigung, daß es sich hierbei um eine sinnvolle und sehr erlebnisreiche Freizeitbeschäftigung handelt, wird nicht ausbleiben.

Sonneberg, im September 1972

Georg Engel

<sup>1</sup> Im allgemeinen reicht es aus, von den angegebenen Büchern jeweils nur einige Abschnitte für das Literaturstudium auszuwählen.

## 1. Allgemeine und technisch-musikalische Einführung

Es gibt eine große Anzahl verschiedenartiger *elektroakustischer* Musikinstrumente. Sie gehören entweder zur Gruppe der *elektromechanischen* oder zur Gruppe der *voll-elektronischen* Instrumente. Hinsichtlich ihrer Tonerzeugung, Zweckbestimmung und Qualität können sie nicht direkt miteinander verglichen werden. Ein Merkmal ist ihnen allen aber gemeinsam: Ohne angeschlossene Lautsprecher erfolgt bei rein elektromechanischen und voll-elektronischen Instrumenten keine bzw., keine ausreichend kräftige Tonabstrahlung. Die Instrumente weisen keine mechanischen Resonatoren zur Lautverstärkung auf, zu ihrem Betrieb sind daher elektronische Verstärker und Lautsprecher unentbehrlich.

Unsere heimische Musikinstrumentenindustrie erreichte nach Beendigung des zweiten Weltkriegs in der Zeit des friedlichen Aufbaus unserer Deutschen Demokratischen Republik einen hohen Leistungsstand. Neben mechanischen Instrumenten, die als Exportartikel in aller Welt gefragt sind, stellen wir seit mehreren Jahren auch elektroakustische, darunter eine Reihe vollelektronischer Musikinstrumente, industriell her.

Seitdem wächst das Interesse an dieser im Musikinstrumentenbau neuen Entwicklungsrichtung. Bei der Vorführung von Instrumenten werden die verschiedensten Fragen gestellt. Viele der Zuhörer musizieren selbst und verwenden elektronische Hilfsmittel und Einrichtungen zur Tonerzeugung und Klangbeeinflussung. Schon mancher Musikfreund hatte den Wunsch, sich eine elektronische Einrichtung oder gar ein elektroakustisches Instrument *selbst zu bauen*. Solche Erwägungen mußten zumeist verworfen werden, weil selbst Elektronikfachleute nur selten die für den Eigenbau notwendigen Ratschläge erteilen konnten. Den Fachleuten fehlen kaum technische, häufig aber

Grundkenntnisse aus der Harmonielehre und dem Musikinstrumentenbau, ohne die sie nicht erfolgreich in die Schaltungstechnik, insbesondere von elektronischen Polyphonen, eindringen können.

Mit der Bearbeitung des Themas „elektromechanische und vollelektronische Musikinstrumente“ wird beabsichtigt, *allen* Interessenten ein vielseitiges und reizvolles Fachgebiet und ein großes Betätigungsgebiet zu erschließen, das der eigenen *schöpferischen* Arbeit kaum Grenzen setzt. Durch ein intensives Erarbeiten des dargebotenen Stoffes, mit etwas Ausdauer und handwerklichem Geschick wird auch ein Laie technische Zusammenhänge erfassen und ein klangschönes und sicher funktionierendes Polyphon<sup>2</sup> nach Bauvorschlägen oder nach eigenen Entwürfen bauen können. Deshalb beschäftigen sich einige Abschnitte mit Vorversuchen für den Selbstbau. Es werden Schaltungen mit geringem Material- und Arbeitsaufwand erprobt, und ihr Zusammenwirken wird demonstriert. Bei gewissenhaftem Aufbau der Versuchsplatinen können sie teilweise für den Bau eines Instruments mitverwendet werden.

Den Darlegungen zum Thema liegen praktische Erfahrungen zugrunde. Es werden nur mehrfach in Polyphonen und elektronischen Orgeln erprobte und bewährte Konstruktionen und Schaltungen für den Nachbau empfohlen. Die Instrumente wurden vom Autor entworfen und überwiegend in Zusammenarbeit mit Mitgliedern von Kulturgruppen, die keine Fachkenntnisse in der Elektronik oder Elektrotechnik besaßen, gebaut.

Jeder Amateur sollte die beschriebenen Versuche ausführen. Die Entscheidung, ob man sich den Selbstbau eines Instruments zutrauen kann, lässt sich leichter treffen, wenn man die Ergebnisse selbstausgeföhrter Vorversuche kennt. Voraussetzung für den erfolgreichen Selbstbau eines Instruments ist die Klarheit über alle Einzelheiten und Zu-

<sup>2</sup> Die Bezeichnung „Polyphon“ wird vom Autor als Sammelbegriff für elektronisch polyphon spielbare Tasteninstrumente bis zu der Größe von Orgeln der Mittelklasse verwendet. Nicht einbezogen sind Orgeln der oberen Mittelklasse und Konzert- oder Kirchenorgeln.

sammenhänge, die schrittweise besprochen werden. Um Fehlschlägen, besonders bei eigenen Entwürfen, vorzubeugen, sollte dem Planen, Konstruieren und Bauen unbedingt ein gründliches Literaturstudium vorausgehen.

## 2. Töne und Klangfarben mechanischer Musikinstrumente und die Elektroakustik

Die Entstehung eines Tones beruht stets auf gleichen Naturgesetzen, gleichgültig, ob er mechanisch oder elektronisch erzeugt wird. Immer werden Schwingungen einer Masse an unser Ohr herangetragen, wobei meist die Luft als Übertragungsmedium dient.

Bei Musikinstrumenten werden z. B. scheiben- oder glockenförmige Körper, Stäbe und Saiten, die teilweise noch zusätzlich mit Resonatoren (mechanische Schallverstärker) versehen sind, durch Reiben, Zupfen oder Schlagen zum Schwingen gebracht. In den Hohlräumen von Blasinstrumenten (Trompeten, Flöten, Posaunen usw. und im weiteren Sinn auch bei Zungeninstrumenten) gerät die Luft durch einen periodisch unterbrochenen Windstrom primär ins Schwingen.

Die meisten Menschen können ohne Schwierigkeiten unterscheiden, ob ein Ton von einem Klavier, einer Violine oder von einem anderen Instrument ausgeht. Daran ändert sich auch bei jeweils gleicher Tonlage der Töne nichts. Die Ursache liegt darin, daß die Instrumente Schwingungen mit unterschiedlichen Kurvenverläufen hervorbringen. Tonanalysen haben ergeben, daß jedem von einem Musikinstrument erzeugten sinusförmigen *Grundton*, der die empfundene Tonhöhe bestimmt, noch weitere Frequenzen (*Ober töne*, *Oberwellen*, *Teiltöne* oder auch *Harmonische* genannt) beigemischt sind. Sie beeinflussen je nach ihrer Stärke, Art und Frequenz die Formen der Schwingungen und damit den Klangcharakter des Grundtons. Die Frequenz des Grundtons wird durch das Vorhandensein von Oberwellen (im allgemeinen ganzzahlige Vielfache des Grundtons) nicht verändert. Die am kräftigsten ausgebildeten Obertöne bezeichnet man als *Formanten*. Bild 2.1 zeigt verschiedene Kurvenverläufe von Tönen gleicher Tonhöhe. Jede der Schwingungsformen weist einen ande-

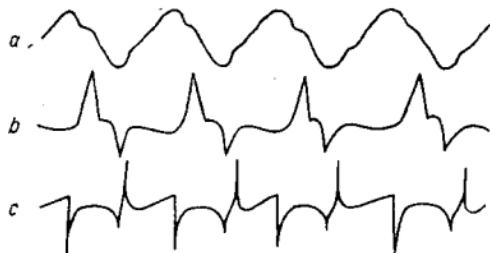


Bild 2.1 Kurvenverlauf von Tönen gleicher Tonhöhe (Grundfrequenz) mit unterschiedlichem Oberwellengehalt; a - weiche, b - näselnde und c - helle Klangfarbe

ren Klangcharakter auf. Bild 2.2 veranschaulicht technische Begriffe einer sinusförmigen Schwingung.

Vom technisch-musikalischen Standpunkt aus betrachtet, gilt für Schwingungen:

Die *Tonhöhe* ist durch die Anzahl der Grundschwingungen je Sekunde (Grundfrequenz) bestimmt. Frequenzen werden in Hertz (Hz) —  $1 \text{ Hz} \leqq 1 \text{ s}^{-1}$  — gemessen.

Der *Klangcharakter* eines Tones verändert sich mit seinem Gehalt an *Oberwellen* und deren Eigenschaften. Enthält ein Ton Teiltöne, die nicht im ganzzahligen Verhältnis zu seiner Grundfrequenz stehen (*Nichtharmonische*), so entsteht ein *Klanggemisch*, das im Extremfall zum *Geräusch* werden kann. Manche Musikinstrumente erzeugen besonders während der Einschwingzeit eines Tones Geräuschanteile (Geräuschvorläufer). Sie führen zu einer charakteristischen Tonansprache.

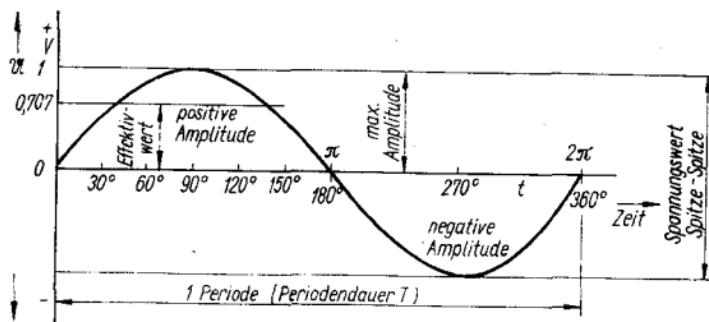


Bild 2.2 Begriffe einer sinusförmigen Schwingung

Die Lautstärke eines Tones hängt von der *Schwingungsweite (Amplitude)* seiner Grundschwingung ab. Unser Lautstärkeempfinden ist frequenzabhängig (Ohrkennlinie), d. h., bei gleichen Amplituden scheint uns ein Ton mit einer Frequenz von beispielsweise 1000 Hz lauter zu sein als ein tieferer Ton, der z. B. nur mit 30 Hz schwingt.

Der *Oberwellengehalt* mechanischer Musikinstrumente wird von ihrem *Gesamtaufbau*, von *Materialeigenschaften* und besonders von der *Form* ihrer *Resonatoren* bestimmt. Daraus und aus der Art ihrer Tonerzeugung erklärt sich der stark unterschiedliche Klang der verschiedenen Schlag-, Zupf-, Blas- und Streichinstrumente.

In *elektroakustischen Übertragungsanlagen* nehmen Mikrofone alle Töne, Geräusche, Klangfarben und Lautstärkeabstufungen fast naturgetreu auf und wandeln diese Schallschwingungen in *analoge* elektrische Schwingungen um. Die elektrischen Schwingungen werden verstärkt und von Lautsprechern wieder in Schallschwingungen umgesetzt. Es liegt daher nahe, Lautsprecher auch direkt als Tonabstrahler für elektroakustische Musikinstrumente zu verwenden. Vergleiche zwischen den klanglichen Eigenschaften mechanischer und elektroakustischer Instrumente zeigen, daß besonders mit Lautsprecherkombinationen sehr gute Ergebnisse erzielt werden können.

Schallwellen zeichnet man *elektromechanisch* (Schallplatte) oder *elektromagnetisch* (Tonband) auf. Die Ausgangsspannungen von Mikrofonen können z. B. auch zur Erzeugung *analoger Intensitätsschwankungen* künstlicher Lichtquellen ausgenutzt werden (Tonfilm, Schallaufzeichnungsverfahren nach dem fotografischen Prinzip). Umgekehrt lassen sich Lichtschwankungen in elektrische Schwingungen und diese wieder in Schallschwingungen verwandeln (z. B. beim Abspielen eines Tonfilms mit *Sprossenschrift*).

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde davon ausgegangen, daß die Schallschwingungen, die von mechanischen Musikinstrumenten ausgehen, von Mikrofonen aufgenommen und in elektrische Schwingungen umgeformt werden. Die elektrischen Schwingungen enthalten alle akustischen

Informationen (Tonhöhen, Klänge und Lautstärkeunterschiede).

Mit elektronischen Schaltungen kann man diese elektrischen Schwingungen auch primär erzeugen. Darauf beruht die Technik elektroakustischer Musikinstrumente. Sie bringen elektrische Schwingungen hervor, die fast alle Merkmale der Schallschwingungen mechanischer Musikinstrumente aufweisen.

Die Tonwiedergabe bei elektromechanischen und vollelektronischen Instrumenten — die Abstrahlung der Töne durch die Lautsprecher — erfolgt erst, wenn der Musiker zu spielen beginnt. Mit *Musikautomaten*, bei denen die Tätigkeit des Spielers durch mechanische oder elektronische Steuerungen ersetzt wird, hat das nichts zu tun. Im Prinzip werden elektroakustische Instrumente wie mechanische Musikinstrumente bedient und gespielt.

In den folgenden Abschnitten werden Begriffe erläutert, die zum Verstehen des Aufbaus und der Funktionsweise elektroakustischer Instrumente nötig sind. Die Darlegungen beschränken sich auf das Wesentliche und dienen nur der *Veranschaulichung* von Begriffen. Die musikwissenschaftliche und Fachliteratur bietet umfangreichere und tiefgründigere Abhandlungen.

In der Zeitschrift *FUNKAMATEUR*, Jahrgang 1966, Hefte 1 bis 12, ist ein Lehrgang „Einführung in die Technik der elektronischen Musikinstrumente“ von *J. Lesche* erschienen. Während die einführenden Abschnitte der vorliegenden Broschüre *allgemeinverständlich* besonders für technisch wenig vorgebildete Leser abgefaßt sind, beschreibt der Verfasser des „*FUNKAMATEUR*-Lehrgangs“ den Stoff mehr vom Standpunkt des Technikers aus. Als technisch weiterführende oder vertiefende Literatur sollte der Lehrgang parallel zu den entsprechenden Abschnitten der vorliegenden Broschüre durchgearbeitet werden. Auch der „technische Laie“ kann daraus profitieren, denn er wird lernen, Allgemeinverständliches mit technisch Speziellem zu verbinden. Das gewinnt noch an Bedeutung, da in Fortführung des Themas „elektromechanische und vollelektrische“

nische Musikinstrumente" auf technisches Wissen nicht verzichtet werden kann.

Der Lehrgang im FUNKAMATEUR enthält eine kurze Einführung, Darlegungen über die Baugruppen verschiedener elektroakustischer Instrumente und die Beschreibung eines Instruments, das der Verfasser selbst angefertigt hat.

Außerdem kann eine Fortsetzungsreihe über *elektronische Orgeln* von K. H. Kupfer empfohlen werden, die in der Zeitschrift *Funktechnik*, Jahrgang 1967, Hefte 6 bis 10, zu finden ist. Beide Aufsätze sind kurz gefaßt und setzen fachliche Kenntnisse voraus.

## 2.1. Verschiedenartige mechanische Musikinstrumente

Mechanische Instrumente sind sehr verbreitet und allen Lesern bekannt. Es werden deshalb Begriffe, die man auch bei elektroakustischen Instrumenten benötigt, zuerst an mechanischen Instrumenten erläutert.

### 2.1.1. Monophone mechanische Instrumente mit im Prinzip nicht veränderlichem Klangcharakter

*Monophon* heißt *einstimmig*. Auf monophonen Instrumenten können *keine Akkorde* erklingen, sondern nur *einzelne Töne nacheinander* gespielt werden. Das trifft für Blasinstrumente wie Flöten, Trompeten, Posaunen und Hörner zu.

Der klangliche Ausdruck dieser Instrumente ist nur durch die Spielweise — etwa durch unterschiedliches Anblasen — zu beeinflussen.

Wird der Schalltrichter einer Trompete verschlossen, so spricht man von einer „gestopften“ Trompete. Sie klingt dann eigentlich hohl. Diese Klangveränderung wird nicht durch die Spielweise, sondern durch eine Formveränderung des Instruments erreicht. Das führt zu anderen Teilton- und Klangverhältnissen. Solche oder ähnliche Veränderungen an den Instrumenten sollen nicht als *Klangregeleinrichtungen* betrachtet werden.

### 2.1.2. Polyphone mechanische Instrumente mit nicht regelbarer Klangbildung

*Polyphon* bedeutet *mehrstimmig*. Auf polyphonen Instrumenten lassen sich *Akkorde* anschlagen (es erklingen *mehrere Töne* in unterschiedlichen Tonlagen gleichzeitig), und es können mehrere Stimmen gespielt werden (z. B. Triospiel). Das Klavier und das Spinett gehören zu dieser Gruppe.

Grenzfälle zwischen monophoner und polyphoner Spielweise liegen z. B. bei der Gitarre und bei Streichinstrumenten vor. Auf Streichinstrumenten musiziert man meist nur einstimmig, jedoch enthalten manche Kompositionen für Streicher auch Mehrklänge (Akkorde). Ein geübter Geigenspieler kann durchaus mehrere Saiten seines Instruments gleichzeitig durch Streichen oder Zupfen erklingen lassen und dabei mit den Fingern der linken Hand die richtigen Tonhöhen auf den Saiten greifen.

### 2.1.3. Polyphon spielbare mechanische Instrumente mit einstellbarem Klangspektrum

Instrumente dieser Gruppe gestatten, *mehrstimmige* und *klanglich abgestufte* Musikstücke zu interpretieren. Die zur Klangbildung benutzten Teiltöne (Register oder Chöre) können einzeln zu- oder abgeschaltet werden. Sie stehen meist in verschiedenen Lautstärkegraden und Klangvarianten zur Verfügung. Damit lässt sich das Klangbild der Instrumente wesentlich verändern. Diese Merkmale sind Kino- oder Konzertorgeln, im eingeschränkten Maß auch einigen Zungeninstrumenten (Harmonium, Akkordeon) und dem Cembalo eigen. Den Abschnitten 2.1.1. bis 2.1.3. entsprechend lassen sich auch elektroakustische Instrumente einordnen.

Viele technisch-musikalische Grundlagen und Begriffe, die für mechanische Musikinstrumente Gültigkeit haben, verlieren bei elektronischen Musikinstrumenten keineswegs an Bedeutung. Konstruktive Einzelheiten und die Klangfarbenbildung sind größtenteils direkt miteinander ver-

gleichbar oder einander sehr ähnlich. Dem Gesamtaufbau größerer elektronischer Polyphone und Orgeln liegen Prinzipien zugrunde, die bereits im Pfeifenorgelbau angewendet wurden.

## 2.2. Klangfarbenbildung bei Kino- und Konzertorgeln mit Pfeifen und ihre Bedeutung für elektro-akustische Musikinstrumente

Schon im zweiten Jahrhundert v. u. Z. wurde die Orgel als weltliches Prunkinstrument benutzt. Seitdem erfuhr dieses älteste und größte Tasteninstrument viele Veränderungen und Neuerungen, über deren Wert es geteilte Meinungen gibt. Zur Unterhaltung mit leichter Musik wurden die unter der Bezeichnung *Kinoorgel* bekannt gewordenen Instrumente gebaut. Sie waren mit normalen *Pfeitensätzen* und Pfeifen besonderer Bauart, mit *Schlagwerken*, anderen *Geräuscherzeugern* und *Glockenspielen* ausgestattet.

Der *strahlende Klang* größerer *Konzertorgeln* im vollen Werk (volles Lautstärke- und Klangvolumen — alle Register „gezogen“) spricht selbst musikalisch weniger emp-

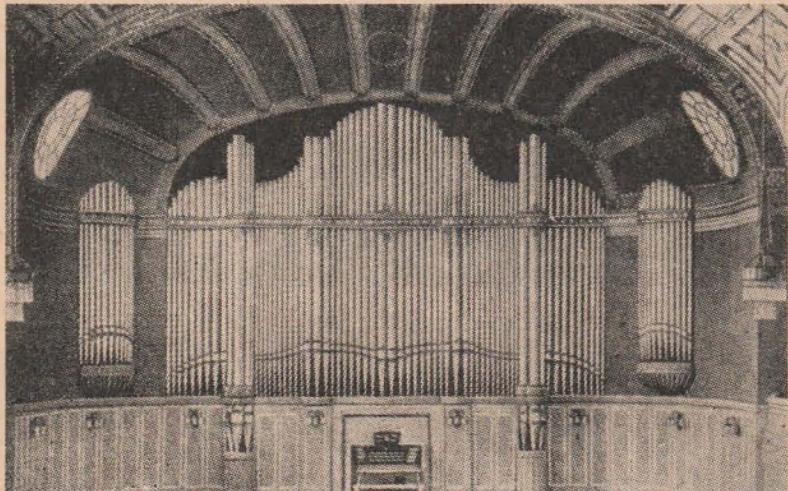


Bild 2.3 Prospekt einer Pfeifenorgel

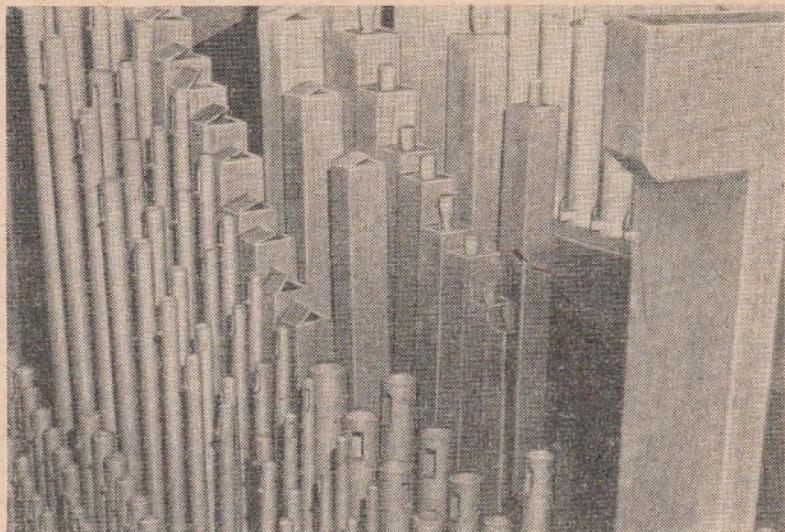
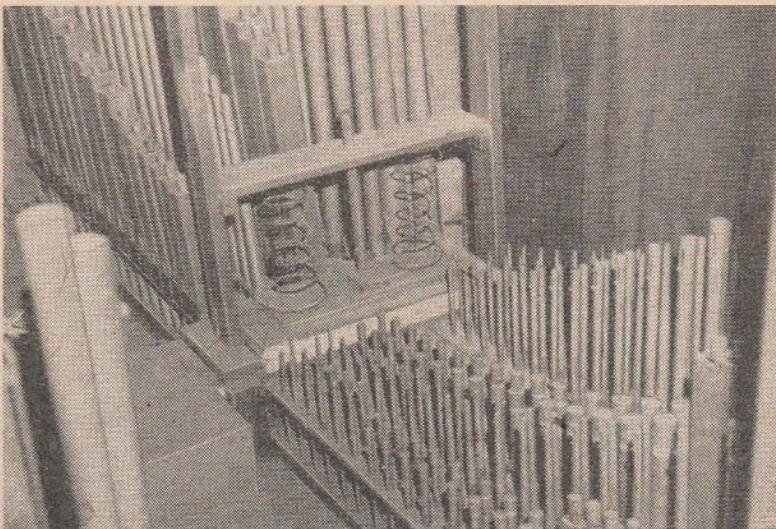


Bild 2.4 Pfeifenraum einer Orgel; a, b – Teilaansichten



findsame Zuhörer an. Der Aufwand, um eine so gewaltige Klangfülle zu erzielen, ist beträchtlich. Er wird meist falsch eingeschätzt. Unsichtbar für den Betrachter befinden sich hinter der aus Pfeifenreihen bestehenden Verkleidung (Fassade oder Prospekt der Orgel) *mehrere tausend*

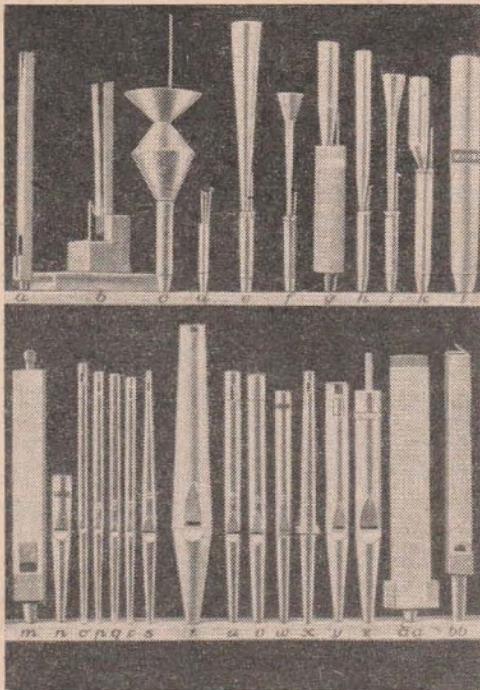


Bild 2.5 Verschiedenartige Orgelpfeifen;

a - Violine, b - Bombardon 32', c - Bärpfife, d - Regal, e - Trompete, f - Kornett, g - durchschlagende Klarinette, h - aufschlagende Klarinette, i - Oboe, k - Vox humana, l - Rantett, m - Bordun Holz, n - gedackt Zinn, o - Acoline, p - Viola di Gamba, q - Dulciana, r - Salicional, s - Spitzflöte, t - Nachthorn, u - Prinzipal mit Stimmschlitz, v - Prinzipal ohne Stimmschlitz, w - Quintatön, x - Doppelprinzipal, y - Bachflöte, z - Rohrflöte, aa - Doppelflöte, bb - Flauto amabile

Pfeifen. In Bild 2.3 ist die Fassade, in Bild 2.4a und Bild 2.4b sind Teile des Inneren einer Orgel mit 18 Registern zu sehen. Die größten Orgeln der Welt haben 20 000 bis nahezu 30 000 Pfeifen. Fast mühelos können Hunderte dieser Pfeifen, die sich in ihrer Bauart, Klangfarbe und Tonhöhe unterscheiden, gleichzeitig zum Erklingen gebracht werden. Die größten Pfeifen sind bei einem Durchmesser von etwa 50 cm länger als 10 m, die kleinsten nur wenige Zentimeter groß. Bild 2.5 zeigt Pfeifen verschiedenartiger Bauformen.

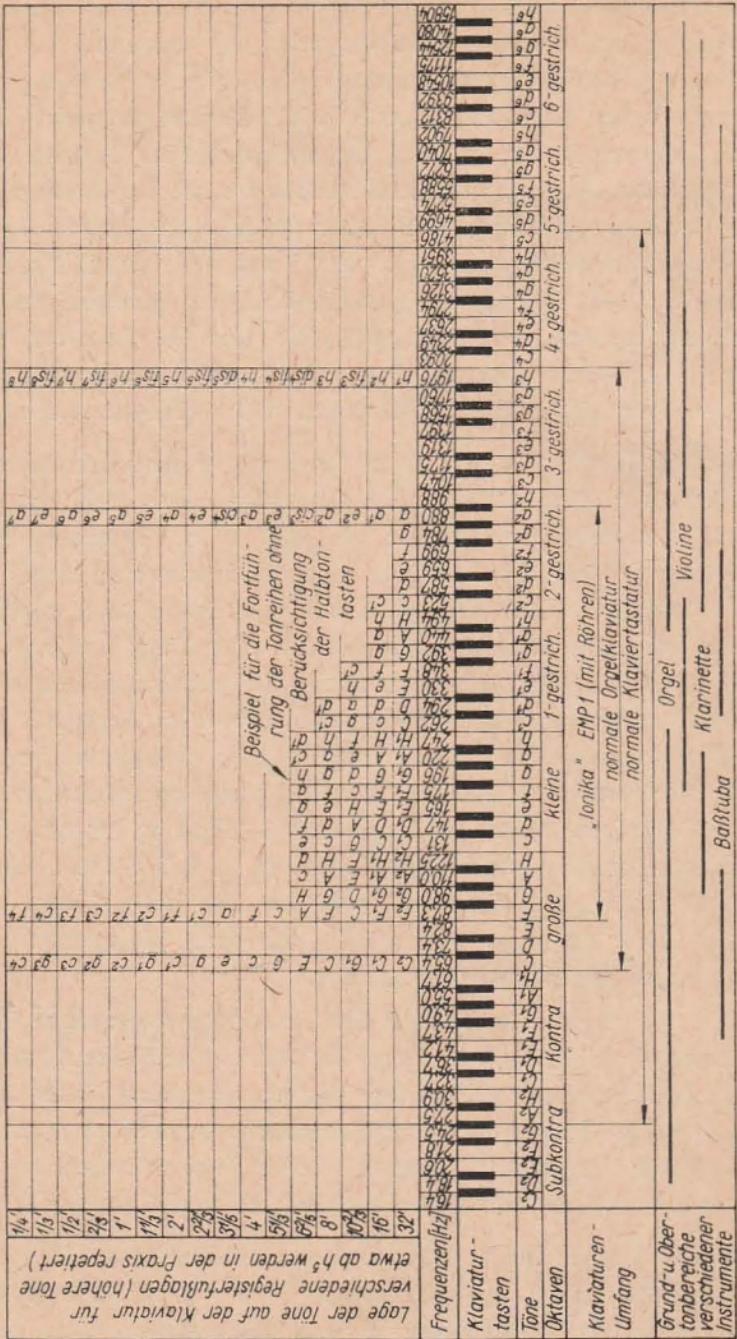
Mit dem Einstellen des Instruments am Spieltisch und dem Anschlagen der Tasten bestimmt der Orgelspieler, welche Pfeifen erklingen sollen. Die Steuerung, daß jeweils nur die ausgewählten Pfeifen ansprechen, muß mit dem technischen Aufbau der Instrumente erreicht werden. Dazu dienen mechanische, pneumatische oder elektrische *Trakturen* (Steuerungssysteme). In der Praxis werden bei einem Instrument die Ventile auch mit mehreren Systemen *gleichzeitig* gesteuert (z. B. elektropneumatische Ventilsteuerung).

Kenntnisse vom grundsätzlichen Aufbau und von der Wirkungsweise einer Pfeifenorgel erleichtern wesentlich das Eindringen in die Schaltungstechnik größerer elektroakustischer Instrumente. Im Rahmen dieser Schrift können aber nur die wichtigsten Zusammenhänge genannt werden.

Die in Abschnitt 2.1.3. genannten Instrumente sowie Polyphone, Elektronen- und *Hammond*-Orgeln sind mit Einrichtungen zur *Klang- und Dynamikveränderung* ausgestattet. Zunächst wird die Bedeutung der Register am Beispiel einer Pfeifenorgel erläutert. Ein *Register* umfaßt eine *Gruppe von Stimmen* (Pfeifen), die sich durch *einheitliche* Bauart und Klangfarbe auszeichnen. Der Einbau eines einfachen Registers erfordert je Taste eine Pfeife. Ein Instrument mit einem Klaviaturumfang von 60 Tasten weist also je Register 60 Pfeifen auf (von der *Mehrflachausnutzung* von Pfeifensätzen bei kleinen Instrumenten sei hier abgesehen). Bei *Mixturregistern* sind einer Taste stets *mehrere* Pfeifen *zgleich* zugeordnet. Ein Instrument mit 100 Registern einfacher Art und 60 Tasten zählt demzufolge 6000 Pfeifen.

In der Regel tragen die Register die Namen ähnlich klingernder Instrumente, und stets sind sie mit einer *Tonlagenangabe* (16', 8', 4' u. a.) versehen. Die *Apostrophe* hinter den Zahlen bedeuten „Fuß“, ein in England benutztes *Längenmaß*. Diese Bezeichnung wird noch heute bei modernen Instrumenten mit unveränderter Bedeutung verwendet und kommt daher, daß die am tiefsten tönenden Pfeifen des

Tabelle 2.1. Klaviaturen, Registerfuslagen und Tonbereiche (Grundtonbereich stark, Obertonbereich schwach ausgezogen)



*8'-Prinzipalregisters* etwa 8 Fuß lang sind und in der *Normaltonlage*, auf die Tastatur bezogen, ertönen. Die den Tasten eines Klaviers zugeordneten Töne erklingen z. B. auch in der Normaltonlage (8'). Bei diesem Vergleich muß aber beachtet werden, daß Orgelklaviaturen (Tabelle 2.1.) gegenüber Klaviertastaturen verkürzt sind. Register in der *4'-Tonlage* erklingen auf jeder Taste eine Oktave höher (Frequenzverdopplung) als ein 8'-Register. Ein 2'-Register klingt 2-, ein 1'-Register 3 Oktaven höher, bezogen auf die Normaltonlage. Es gibt auch 16'- und 32'-Register. Gegenüber einem 8'-Register klingt ein 16'-Register eine Oktave, ein 32'-Register 2 Oktaven tiefer (Frequenzteilung).

Wird auf einer Orgel z. B. ein 8'-Register eingeschaltet und die Taste a<sup>4</sup> (s. Tabelle 2.1.) betätigt, dann erklingt der Ton a<sup>4</sup>, der „Kammerton a“, mit einer Frequenz von 440 Hz. Bleibt die Taste a<sup>4</sup> niedergedrückt und wird ein 16'-Register hinzugeschaltet, so hört man einen zweiten Ton, der eine Oktave tiefer als der erste liegt und mit der Frequenz 220 Hz schwingt. Beim Hinzuschalten eines 4'-Registers kommt ein dritter Ton mit einer Frequenz von 880 Hz hinzu. Werden z. B. noch weitere 5 Register jeweils in einer anderen Fußlage eingeschaltet, so erklingen auf der einzigen Taste a<sup>4</sup> insgesamt 8 Töne in unterschiedlicher Tonhöhe und Klangfarbe (s. Tabelle 2.1.). Beim *gleichzeitigen Anschlagen mehrerer Tasten addieren* sich alle Töne zu einer Klangfülle, die dem Klangbild einer größeren Pfeifenorgel entspricht.

Bild 2.6 zeigt schematisch die Funktionsweise einer Pfeifenorgel mit 3 Registern und 60 Tasten. Auf jeder Registerwindlade stehen 60 Pfeifen, die entsprechend ihrer Tonhöhe den 60 Tasten des Spieltisches zugeordnet sind. In Bild 2.6 ist nur *eine* Taste mit ihren Verbindungen zu den Pfeifenventilen der 3 Register (8', 4' und 2') gezeichnet.

Die Pfeifenventile kann man von den Tasten aus über mechanische Züge (*Abstrakten*), über Druckluftleitungen (*pneumatisch*, Betätigen kleiner Blasebälge) oder über *elektrische Leitungen* (elektromagnetische Ventilsteuerung)

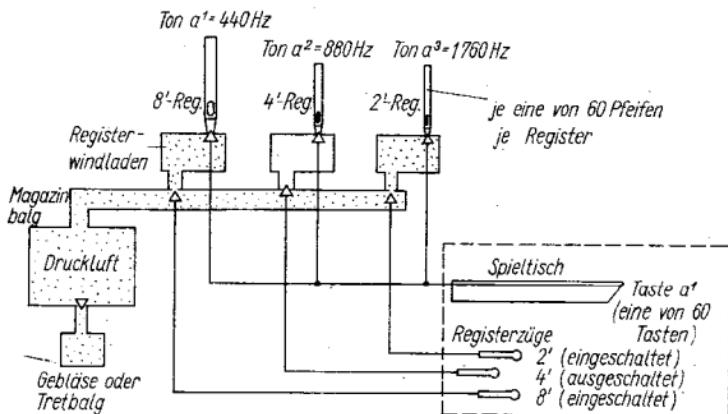


Bild 2.6 Aufbau- und Funktionsschema einer Pfeifenorgel. Die Pfeifen- bzw. Registriventilsteuerung erfolgt vom Spieltisch aus über Abstrakte aus Holz, Druckluftleitungen oder über elektrische Kabelverbindungen

öffnen. Gleichermaßen gilt das für die Registriventile. Es ertönen nur die Pfeifen, deren Registerwindladen vorher durch das Öffnen der Registriventile (Register eingeschaltet) unter Luftdruck gesetzt wurden. In Bild 2.6 ist das Register II (4') ausgeschaltet, beim Drücken der Taste a<sup>1</sup> erklingen nur die Pfeife a<sup>1</sup> des 8'-Registers und die Pfeife a<sup>3</sup> des 2'-Registers. Die Pfeife a<sup>2</sup> des 4'-Registers bleibt stumm, obwohl sich ihr Pfeifenventil mit öffnet. Der Pfeife fehlt in der 4'-Registerwindlade der Luftdruck (4'-Register ist ausgeschaltet).

Die Orgelmechanik, die *Windkästen*, das *Druckluftsystem* usw. sind viel feiner und komplizierter aufgebaut, als das in Bild 2.6 gezeigt werden konnte, jedoch geht das Funktionsprinzip aus der Darstellung eindeutig hervor.

Jeder Fußlage (*Chor*) sind meist *mehrere* Register zugeordnet. Sie unterscheiden sich in ihrer Lautstärke und im Klangcharakter voneinander. Durch die Wahl der Register stellt der Musiker den Klang seines Instruments ein. Während eines Vortrags können Register oder Registergruppen zu- oder abgeschaltet werden. Zur Klang- und Lautstärkebeeinflussung stehen noch weitere Einrichtungen, teilweise

als *Spielhilfen* bezeichnet, zur Verfügung. Die Lautstärke einer Pfeifenorgel richtet sich nach der Art und Zahl der eingeschalteten Register. Bei anderen Instrumenten mit Registern (Harmonium, Cembalo, Harmonika usw.) erreicht man Lautstärkeunterschiede außer durch den Registerwechsel noch durch das Verändern des Luftdrucks bzw. der Kraft beim Tastenanschlagen.

Große Instrumente werden mit mehreren übereinanderliegenden Tastenreihen (*Manualen*) und meistens auch mit einem *Baßpedal* (Klaviatur zum Spielen mit den Füßen) ausgerüstet. Jede Tastenebene lässt sich klanglich und in der Lautstärke anders registrieren. Der Musiker wechselt während seines Vortrags von der einen zur anderen Tastenebene über und verleiht dadurch seinen Darbietungen einen starken Ausdruck; bestimmte Töne, Takte oder Partien können herausgehoben werden. Mit *Schwellern* wird die Lautstärke einer Reihe von Registern kontinuierlich geregelt. Koppeln (mechanische Spielhilfen) schaffen Querverbindungen zwischen den einzelnen Tastenebenen. Dadurch kann man z. B. Register des II. Manuals auf dem I. Manual *miterklingen* lassen oder die Register des I. Manuals auf der Pedaltastatur spielen. *Sub-* und *Superoktavkoppeln* wirken jeweils im Bereich einer Tastenebene (beim Betätigen einer Taste werden die um eine Oktave *tiefer* (sub) oder die um eine Oktave *höher* (super) liegenden Tasten mit ausgelöst).

Durch andere Schaltvorgänge erfährt man ganze Registergruppen. So gibt es feste *Klangkombinationen*, *Absteller* für bestimmte Pfeifengruppen und das *Tutti*, ein Druckknopf- oder Zugregister, mit dem das volle Werk (alle Register der Orgel) gleichzeitig eingeschaltet werden kann.

Mixturregistern sind 2 bis 5, bisweilen noch mehr Pfeifen je Taste zugeordnet. Beim Einschalten dieser Register kommt es zu sehr markanten Klangveränderungen, denn es handelt sich um besonders obertonreiche Stimmengruppen bzw. Töne, die die *Klangkrone* der Orgel bilden. Zu ihr gehören auch Register wie Scharf, Zimbel, Scharfzimbel und Rauschpfeife sowie alle Register der hohen Fuß-

lagen. Zimbeln, Kornette und Scharfregister sind Stimmengruppen mit meist 2 bis 3 Pfeifen je Taste. Man spricht von Zimbel 2fach, Mixtur 4fach usw.

Register mit *gebrochenen Fußlagenzahlen* ( $5\frac{1}{3}'$ ,  $1\frac{3}{5}'$  usw.) sind Quinten, Terzen, Septimen und andere auf den Grundton bezogene Intervalle. Mixturen können nicht als selbständige Stimmen benutzt werden, sie verlangen das Hinzuschalten von Grundtonregistern ( $5\frac{1}{3}' + 16'$ ,  $2\frac{2}{3}' + 8'$ ). Quinten, Terzen und Septimen „würzen“ das Klangbild. In der Tabelle 2.2. sind Fußlagen und deren Beziehungen zu Begriffen der Harmonie- und Schwingungslehre zusammengestellt.

Die Pfeifenreihen hoher Fußlagen müssen nach den höheren Tönen hin abgebrochen werden, da zu kleine Pfeifen mehr zischen als klingen. Man *repetiert* die Register, was besonders deutlich bei Mixturen zu hören ist: Die Töne springen *etappenweise* in die Quintlagen (*milde Repetition*) oder in die darunterliegenden Oktavlagen (*wilde Repetition*) zurück. Beim *chromatischen* Spiel (die Tasten werden der Reihe nach angeschlagen) kann man die Tonsprünge deutlich heraus hören, wenn man die Mixturregister allein, ohne grundtönige Stimmen — was sonst nie geschieht — einschaltet.

*Freie Kombinationen* dienen der *Registervorwahl*. Während eines Konzerts stellt eine zweite Person die Registrierung für das folgende Musikstück mit 2 bis 4 Vorwahleinrichtungen ein. Der Organist betätigt dann nur Druckknöpfe zum Ein- und Ausschalten der freien Kombinationen. Register, die vorher eingestellt waren, schalten sich ab, die in der jeweiligen freien Kombination vorgewählten Register schalten sich ein. Spielpausen wegen Registrierungswechsel entfallen. Freie Kombinationen findet man jedoch nur bei großen Instrumenten.

Mit der vom künstlerischen Standpunkt aus verpönten Registerwalze (*Crescendo-Walze*) kann der Orgelspieler nach feststehender Reihenfolge in immer zunehmender Anzahl Register einschalten. Die Lautstärke nimmt zu, und der Klang ändert sich bis zum Anschlag der Walze (volles

Tabelle 2.2. Obertonreihen, vom 32', 16', 8' und 4' aus aufgebaut (Nonen, Quarten und Sexten sind nicht aufgeführt)

Fußlagen	Intervall	Nummer des Obertons	Nummer des Teiltons (Harmon.)	Auf der Taste c' erklingender Ton (Note)	Frequenz (Hz)	Frequenzverhältnis zum Grundton
32'	Prim	Grundton	1. Teilton	c	65,4	1:1
16'	Oktave	1. Oberton	2. "	c	130,8	2:1
10 2/3'	Quinte	2. "	3. "	g	196,0	3:1
8'	Oktave	3. "	4. "	c'	261,6	4:1
6 2/5'	Terz	4. "	5. "	e'	329,7	5:1
5 1/3'	Quinte	5. "	6. "	g'	392,0	6:1
4 4/7'	> Septime	6. "	7. "	ais <sup>1</sup>	466,2	7:1
4'	Oktave	7. "	8. "	c <sup>2</sup>	523,3	8:1
16'	Prim	Grundton	1. Teilton	c	130,8	1
8'	Oktave	1. Oberton	2. "	c'	261,6	2:1
5 1/3'	Quinte	2. "	3. "	g'	392,0	3:1
4'	Oktave	3. "	4. "	c <sup>2</sup>	523,2	4:1
3 1/5'	Terz	4. "	5. "	e <sup>2</sup>	659,3	5:1
2 2/3'	Quinte	5. "	6. "	g <sup>2</sup>	784,0	6:1
2 2/7'	> Septime	6. "	7. "	ais <sup>2</sup>	932,4	7:1
2'	Oktave	7. "	8. "	c <sup>3</sup>	1046,5	8:1
1 3/5'	Terz	9. "	10. "	e <sup>3</sup>	1318,6	10:1
1 1/3'	Quinte	11. "	12. "	g <sup>3</sup>	1568,0	12:1
1 1/7'	> Septime	13. "	14. "	ais <sup>3</sup>	1864,8	14:1
1'	Oktave	15. "	16. "	c <sup>4</sup>	2093,0	16:1
8'	Prim	Grundton	1. Teilton	c <sup>1</sup>	261,6	1
4'	Oktave	1. Oberton	2. "	c <sup>2</sup>	523,2	2:1
2 2/3'	Quinte	2. "	3. "	g <sup>2</sup>	784,0	3:1
2'	Oktave	3. "	4. "	c <sup>3</sup>	1046,5	4:1
1 3/5'	Terz	4. "	5. "	e <sup>3</sup>	1318,6	5:1
1 1/3'	Quinte	5. "	6. "	g <sup>3</sup>	1568,0	6:1
1 1/7'	> Septime	6. "	7. "	ais <sup>3</sup>	1864,8	7:1
1'	Oktave	7. "	8. "	c <sup>4</sup>	2093,0	8:1
4/5'	Terz	9. "	10. "	e <sup>4</sup>	2637,2	10:1
2 1/3'	Quinte	11. "	12. "	g <sup>4</sup>	3136,0	12:1
4 4/7'	> Septime	13. "	14. "	ais <sup>4</sup>	3729,6	14:1
1 1/2'	Oktave	15. "	16. "	c <sup>5</sup>	4186,0	16:1
4'	Prim	Grundton	1. Teilton	c <sup>2</sup>	523,2	1
2'	Oktave	1. Oberton	2. "	c <sup>3</sup>	1046,5	2:1
1 1/3'	Quinte	2. "	3. "	g <sup>3</sup>	1568,0	3:1
1'	Oktave	3. "	4. "	c <sup>4</sup>	2093,0	4:1
4/5'	Terz	4. "	5. "	e <sup>4</sup>	2637,2	5:1
2 1/3'	Quinte	5. "	6. "	g <sup>4</sup>	3136,0	6:1
4 4/7'	> Septime	6. "	7. "	ais <sup>4</sup>	3729,6	7:1
1 1/2'	Oktave	7. "	8. "	c <sup>5</sup>	4186,0	8:1
2 1/5'	Terz	9. "	10. "	e <sup>5</sup>	5274,9	10:1
1 1/3'	Quinte	11. "	12. "	g <sup>5</sup>	6272,0	12:1
2 1/7'	> Septime	13. "	14. "	ais <sup>5</sup>	7459,2	14:1
1 1/4'	Oktave	15. "	16. "	c <sup>6</sup>	8372,0	16:1

Werk). Zum schnellen Spielbereitmachen des Instruments und für nicht zu große Ansprüche an den musikalischen Ausdruck erfüllen Registerwalzen (sie werden mit dem Fuß betätigt) ihren Zweck.

Bild 2.7 und Bild 2.8 zeigen den Spieltisch einer Pfeifenorgel mit elektrischer Traktur und seinen Innenaufbau. Der Aufwand für die Klangbildung und für klangliche *Effekte* ist bei elektroakustischen Instrumenten viel geringer als bei Pfeifenorgeln. Eine große Elektronenorgel nimmt weniger Platz als der Spieltisch einer großen Pfeifenorgel ein. Bei dieser wird der meiste Raum zur Unterbringung der Pfeifen, Spielmechanik, Windkanäle, Magazinbälge, Windladen und Gebläse benötigt. Der Schweller eines elektroakustischen Instruments regelt in weiten Grenzen die Lautstärke der Lautsprecher. In Pfeifeninstrumente müssen zu diesem Zweck riesige *Schwellenkästen* mit verschließbaren Schallgittern eingebaut werden. Im Inneren der Kästen befinden sich die Pfeifensätze einiger Register. Durch das kontinuierliche Öffnen und Schließen der Schallgitter wird im begrenzten Umfang ein Schwellen der Lautstärke erreicht.

Regelmäßiges Auf- und Abschwellen der Lautstärke nennt

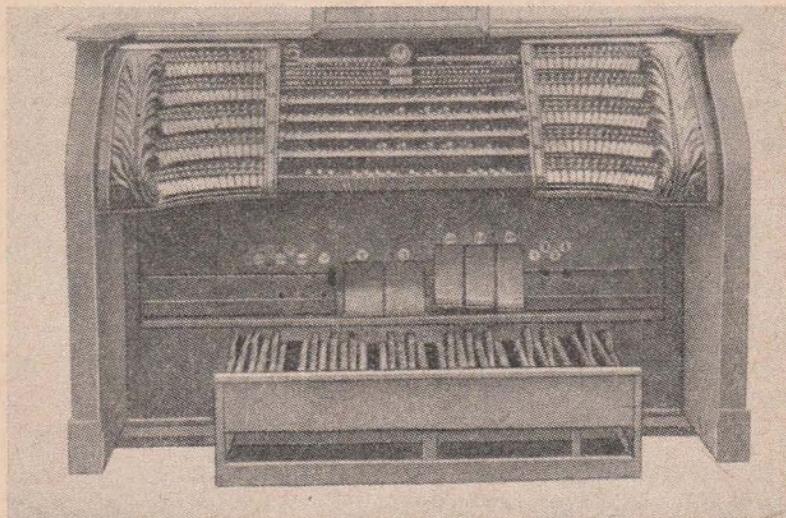


Bild 2.7 Spieltisch einer großen Pfeifenorgel

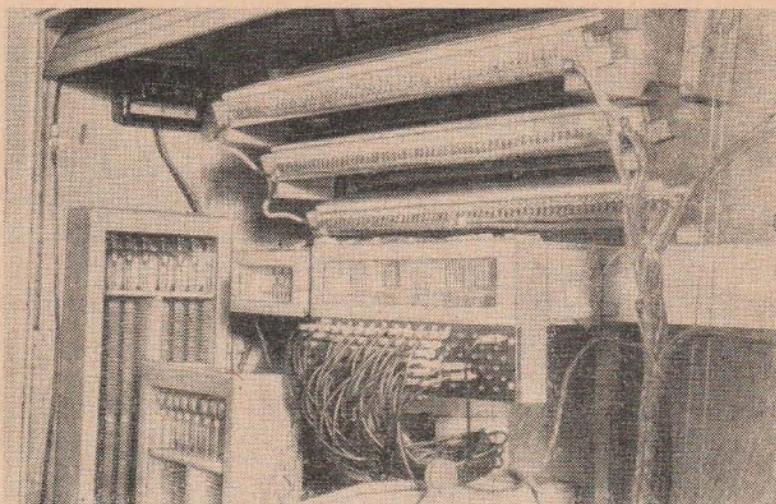


Bild 2.8 Inneres eines Spieltisches (Pfeifenorgel mit elektrischer Traktur)

man *Tremolo* (häufig wird es auch als *Amplitudenvibrato* bezeichnet). Regelmäßige *Tonhöhenveränderungen* ergeben das *Frequenzvibrato*. Die Stärke eines Vibratos drückt sich in der Größe der Lautstärkeschwankungen (Tremolo) oder beim Frequenzvibrato im Betrag der Frequenzänderungen (Frequenzhub) aus. Ein Geigenspieler führt beispielsweise beim Andrücken der Saiten Bewegungen mit der Hand aus, die Frequenzänderungen (Tonhöhenschwankungen) — ein Frequenzvibrato — hervorrufen. Die Frequenzänderungen entstehen, weil die Handbewegungen abwechselnd die jeweils schwingende Saite verkürzen und verlängern. Die Schnelligkeit eines Vibratos ergibt sich aus der Anzahl der Lautstärke- bzw. Frequenzänderungen innerhalb einer bestimmten Zeitdauer. Vibratofrequenzen liegen etwa zwischen 3 Hz und 10 Hz. Pfeifenorgeln haben keine Einrichtungen zur Erzeugung eines Frequenzvibratos. Vibratoreffekte sind besonders in der Unterhaltungsmusik wirkungsvoll.

Zum Vergleich werden jetzt die Daten einer Pfeifenorgel und eines elektronischen Polyphons gegenübergestellt. Die Dispositionen sind in Anlehnung an Instrumente ähnlicher Größe frei gewählt.

Daten	einer einmanualigen Pfeifenorgel	eines einmanualigen Polyphons
Tastatur:	54 Tasten von C bis f <sup>3</sup>	48 Tasten von F bis e <sup>3</sup>
Klingender Ton- umfang:	90 Töne von C bis f <sup>5</sup>	84 Töne von F bis e <sup>5</sup>
Frequenz- bereich:	von 32,7 bis 5587,2 Hz (ohne Oberwellen)	von 43,7 bis 5274,9 Hz
Abmes- sungen:	Spieltisch etwas größer als der des Polyphons	Spieltisch, Verstärker und Lautsprecher ein- gebaut
Breite:	6 m	1 m
Tiefe:	3 m	0,4 m
Höhe:	5 m	0,9 m
Gewicht:	einige 1000 kp	65 kp
Schweller:	wirkt auf 3 Register	wirkt auf alle Register
Régitster:	1. Fagott 16' 2. Prinzipal 16' 3. Prinzipal 8' 4. Krummhorn 8' 5. Gedackt 8' 6. Rohrflöte 8' 7. Klarine 4' 8. Oktave 4' 9. Quinte 2 <sup>2</sup> / <sub>3</sub> ' 10. Waldflöte 2' 11. Oktave 2' 12. Glockenspiel c <sup>3</sup> bis f <sup>3</sup> 13. Zimbel 2fach 14. Mixtur 3fach 15. Tutti Natürlicher Hall je nach Raumbeschaffenheit	Fagott 16' Baßklarinette 16' Horn 8' Cello 8' Oboe 8' Klarinette 8' Viola 4' Flöte 4' Quinte 2 <sup>2</sup> / <sub>3</sub> ' Flöte 2' Pikkolo 2' Perkussion Klangkombination I Klangkombination II Klangkombination III Tremolo Frequenzvibrato künstlicher Hall

Anmerkung: Es wird empfohlen, beim Lesen dieser Abschnitte neuere Lexika, musikwissenschaftliche Nachschlagewerke oder Fremdwörterbücher zu benutzen, um über unbekannte Begriffe nachlesen zu können.

## 2.3. Ton- und Klangfarbenerzeugung bei elektro-akustischen Musikinstrumenten

In elektroakustische Musikinstrumente werden Schwingungserzeuger eingebaut, die obertonarme oder obertonreiche Schwingungen abgeben. Durch das Mischen obertonarmer, harmonisch zusammenklingender Frequenzen erhält man Schwingungsverläufe mit reichen Oberwellenanteilen (additive Klangbildung). Umgekehrt können obertonreiche Schwingungen durch Filter in ihre verschiedenen Frequenzanteile zerlegt (*selektives Verfahren*), ihre Obertöne abgeschwächt oder hervorgehoben werden. Daher besteht die Möglichkeit, charakteristische Schwingungsverläufe, die denen mechanischer Musikinstrumente ähnlich sind, mit elektronischen Mitteln zu formen.

Schwierig ist es, *Ein- und Ausschwingvorgänge* und *Geräuschanteile*, die den Klang eines Instruments mit prägen, elektronisch zu erzeugen und auszubilden. Zwar kommt es auch in elektronischen Geräten zu Ein- und Ausschwingvorgängen, und auch Lautsprecher zeigen diese Eigenschaften, jedoch erfolgen sie so schnell, daß sie unser Ohr kaum registrieren kann. Deshalb empfindet man bei manchen elektroakustischen Instrumenten den Toneinsatz hart und pochend. Verschiedene Maßnahmen führen aber zu einem weicheren Toneinsatz.

Was technisch zu erreichen ist, zeigte folgender Versuch. Musikfachleuten wurde abwechselnd eine elektronische und eine Pfeifenorgel vorgespielt. Sie sollten heraushören, welches der beiden Instrumente jeweils erklang. Die elektronische Orgel war mit dem Ziel, dem Klangcharakter der Pfeifenorgel nahezukommen, gebaut und aufgestellt worden. Die sich in ihrem Urteil sicher fühlenden Experten waren verblüfft und trafen häufig falsche Entscheidungen.

Aber warum streitet man sich darüber? Die elektronischen Instrumente haben ihren arteigenen Klang wie andere Instrumente auch. Weshalb sollen elektronische Orgeln unbedingt möglichst naturgetreu Pfeifenorgelklänge nachahmen? Sicher ist, daß eine kleine elektronische Orgel z. B.

als Hausinstrument dem Musikfreund viel mehr Variationsmöglichkeiten bietet als eine Hausorgel mit Pfeifen, die sich früher privilegierte Kreise bauen ließen, obwohl sie sich nur kleine Instrumente mit wenigen Registern anschaffen konnten. Für eine große Orgel waren ihre Villen meistens doch noch zu klein.

Die Mehrzahl der Interessenten an einer elektronischen Orgel hat gewiß auch nicht den Wunsch, das Instrument an Stelle einer Pfeifenorgel zur Begleitung sakraler Gesänge zu verwenden.

Ein größeres elektronisches Polyphon läßt sich ohne Schwierigkeiten in kleinen Räumen aufstellen und betreiben. Es kann den akustischen Verhältnissen im Gegensatz zu einer Pfeifenorgel einfacher und besser angepaßt werden. Den Freunden von Orgelkompositionen der großen Meister wie Bach, Händel, Reger u. a. sei gesagt, daß sie diese Werke durchaus auf üblichen Polyphonen vortragen können.

Auf einer großen, vom Verfasser entworfenen und mit einer Arbeitsgemeinschaft gebauten elektronischen Orgel nach Bild 3.3 haben Organisten klassische Werke gespielt. Sie waren von der Leistungsfähigkeit des Instruments, das in einem großen Raum aufgestellt war, überrascht. Einer von ihnen schrieb, als das Instrument auf der *Messe der Meister von morgen* gezeigt wurde, in einer Zeitungsnotiz (auszugsweise Zitat)<sup>3</sup>: „Die elektronische Orgel hält den heutigen Ansprüchen stand, besitzt zwei Klaviere und Pedal als Standgerät. Die akustischen Variationsmöglichkeiten sind so vielfältig, daß es eines Studiums bedarf, um alle Möglichkeiten auszuschöpfen. Als Felsenorgel könnte sie in Neufang<sup>4</sup> ihren Platz einnehmen und, durch an den Felswänden aufgehängte Lautsprecher unterstützt, weit ins Sonneberger Land erklingen.“

Der Verfasser des Artikels gab auf dem Instrument ein klassisches Konzert mit Werken von Bach, Händel und

<sup>3</sup> In: „Freies Wort“, September 1966.

<sup>4</sup> Eine auf einem hohen Berg bei Sonneberg gelegene Ortschaft mit stillgelegten Steinbrüchen.

Zeitgenossen. Das transistorisierte Instrument wurde für universellen Einsatz projektiert. Nur der NF-Verstärker (ähnlich dem 25-W-Normverstärker vom VEB *Funkwerk* Kölleda mit 2 Endröhren *EL 34*) und der Nachhallverstärker waren noch mit Röhren bestückt. Die Tonabstrahlung erfolgte über 2 Lautsprecherboxen. Besonderheiten zur Nachbildung von Pfeifenorgelklängen waren nicht eingebaut worden.

Elektroakustische Instrumente werden im allgemeinen für Unterhaltungs- und Tanzmusik eingesetzt. Die im weiteren besprochenen Instrumente tragen besonders diesem Verwendungszweck Rechnung. In ihrem Aufbau findet man keine komplizierteren elektronischen Schaltungen als in den Geräten der Unterhaltungselektronik. In Abschnitt 2.2. wurde festgestellt, daß sich die Klangfarbenbildung bei elektroakustischen Instrumenten im Prinzip nicht anders als bei Pfeifenorgeln vollzieht. Dieser Sachverhalt soll an dem in Bild 2.9 dargestellten *Übersichtsschaltplan* eines einfachen Polyphons erläutert werden.

Im Generatorsatz des Instruments sind 72 Tongeneratoren zu einem Aggregat vereinigt. Sie erzeugen ständig (*Dauertongeneratoren*) und vollelektronisch alle Töne (Frequenzen) in Form stark obertonhaltiger Schwingungen, z. B. von  $C = 65,4$  Hz bis  $h^4 = 3951,2$  Hz (s. Tabelle 2.3.). Die Generatoren speisen die *Kontakte des Tastenkontaktsatzes*, der zusammen mit den Klaviaturtasten (Manual) eine zweite komplexe Baugruppe bildet. Beim Betätigen der Tasten gelangen die obertonreichen Frequenzen zum *Registerteil*. Die Ausgänge der Tongeneratoren liegen geordnet an den Kontakten des Tastenkontaktsatzes an, so daß

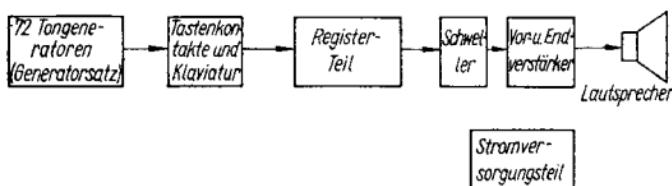


Bild 2.9 Übersichtsschaltplan eines einfachen Polyphons

Tabelle 2.3. Tonfrequenzen (Orchesterstimmung)

Ton	Frequ. [Hz]
C <sub>2</sub>	16,4
Cis <sub>2</sub>	17,4
D <sub>2</sub>	18,4
Dis <sub>2</sub>	19,4
E <sub>2</sub>	20,6
F <sub>2</sub>	21,8
Fis <sub>2</sub>	23,2
G <sub>2</sub>	24,5
Gis <sub>2</sub>	25,9
A <sub>2</sub>	27,5
Ais <sub>2</sub>	29,1
H <sub>2</sub>	30,9

C <sub>1</sub>	32,7
Cis <sub>1</sub>	34,7
D <sub>1</sub>	36,7
Dis <sub>1</sub>	38,9
E <sub>1</sub>	41,2
F <sub>1</sub>	43,7
Fis <sub>1</sub>	46,3
G <sub>1</sub>	49,0
Gis <sub>1</sub>	51,9
A <sub>1</sub>	55,0
Ais <sub>1</sub>	58,3
H <sub>1</sub>	61,7

Ton	Frequ. [Hz]
c	130,8
cis	138,6
d	146,9
dis	155,6
e	164,8
f	174,6
fis	185,0
g	196,0
gis	207,7
a	220,0
ais	233,1
h	246,9

c'	261,6
cis'	277,2
d'	293,7
dis'	311,2
e'	329,7
f'	349,2
fis'	370,0
g'	392,0
gis'	415,4
a'	440,0
ais'	466,2
h'	493,9

Ton	Frequ. [Hz]
c <sup>3</sup>	1046,5
cis <sup>3</sup>	1108,8
d <sup>3</sup>	1174,8
dis <sup>3</sup>	1244,6
e <sup>3</sup>	1318,6
f <sup>3</sup>	1396,8
fis <sup>3</sup>	1480,0
g <sup>3</sup>	1568,0
gis <sup>3</sup>	1651,4
a <sup>3</sup>	1760,0
ais <sup>3</sup>	1864,8
h <sup>3</sup>	1975,6

c <sup>4</sup>	2093,0
cis <sup>4</sup>	2217,6
d <sup>4</sup>	2349,6
dis <sup>4</sup>	2489,2
e <sup>4</sup>	2637,2
f <sup>4</sup>	2793,6
fis <sup>4</sup>	2960,0
g <sup>4</sup>	3136,0
gis <sup>4</sup>	3322,8
a <sup>4</sup>	3520,0
ais <sup>4</sup>	3729,6
h <sup>4</sup>	3951,2

Ton	Frequ. [Hz]
c <sup>5</sup>	4186,0
cis <sup>5</sup>	4435,2
d <sup>5</sup>	4699,2
dis <sup>5</sup>	4978,4
e <sup>5</sup>	5274,9
f <sup>5</sup>	5587,2
fis <sup>5</sup>	5920,0
g <sup>5</sup>	6272,0
gis <sup>5</sup>	6645,6
a <sup>5</sup>	7040,0
ais <sup>5</sup>	7459,2
h <sup>5</sup>	79024

Andere Schreibweisen: z.B.

C<sub>2</sub> ≈ C

A<sub>2</sub> ≈ A

D<sub>1</sub> ≈ D

Dis<sub>1</sub> ≈ Dis

c' ≈ c'

d' ≈ d'

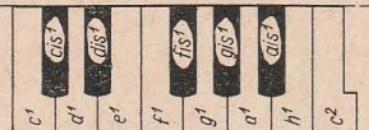
a<sup>3</sup> ≈ a'''

ais<sup>3</sup> ≈ ais'''

h<sup>4</sup> ≈ h'''

fis<sup>5</sup> ≈ fis'''

Lage der Töne auf der Tastatur  
(z.B.: Eine Oktave von c' bis c<sup>2</sup>)



innerhalb der einzelnen Fußlagen die zu einer Taste gehörenden Tonfrequenzen zum Registerteil weitergeleitet werden. Bei der Pfeifenorgel wurden jeder Taste bestimmte Pfeifen zugeordnet; bei der elektronischen Orgel werden den Tastenkontakten bestimmte Tonfrequenzen von den Generatoren zugeführt, deren Frequenzen identisch mit den Tonhöhen der Pfeifen einer mechanischen Orgel sind (s. Bild 2.6 und Abschnitt 2.2.).

Beim Anschlagen der Tasten gelangen die Tonfrequenzen auf Sammelschienen. Jedem Chor ist eine solche Schiene zugeordnet. Um eine additive Klangbildung zu erreichen, würde es genügen, Sinusschwingungen zu bilden und jeden Chor (Fußlage) *einzel*n in der Lautstärke regelbar auszuführen. Auf diese Weise könnte man den Grundtönen Ober- töne unterschiedlicher Stärke und Frequenz additiv beimischen und viele Klangfarben erzielen. Es ist jedoch vorteilhafter, die chorweise zur Verfügung stehenden obertonreichen Schwingungen über elektrische Filter — die Register eines Polyphons — zu leiten. Bild 2.10 zeigt, daß die obertonreichen Frequenzen der einzelnen Chöre durch Fil-

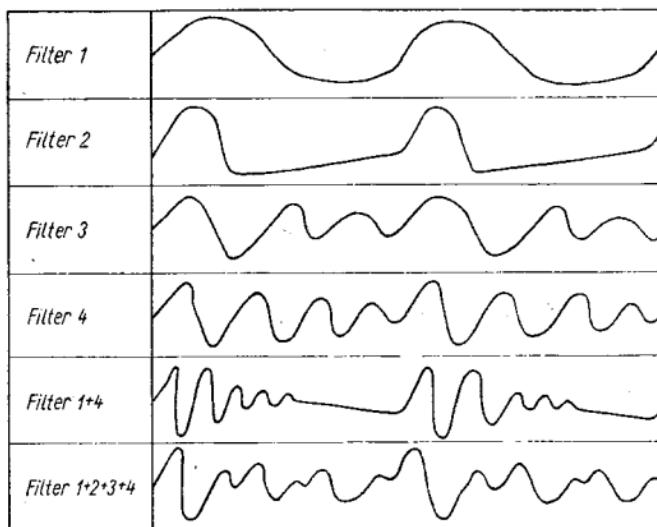
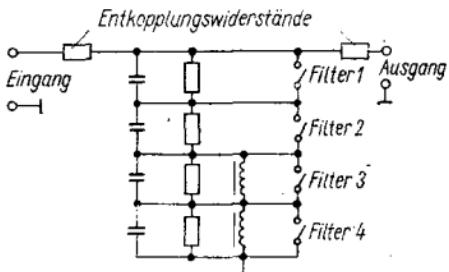


Bild 2.10 Verformung einer obertonreichen Schwingung (Sägezahnpause) durch Filter

Bild 2.11 Filterschaltung (4 Register eines Polyphons)



terschaltungen in Schwingungen mit sehr unterschiedlichem Oberwellengehalt umgeformt werden können (selektives Klangumformungsverfahren). Die Filter bestehen aus Spulen, Kondensatoren und ohmschen Widerständen, die nach Bild 2.11 in einfacher Weise zusammengeschaltet sind. Die Schaltungsart und die Bemessung der Bauelemente der Filter bestimmen den Klangcharakter, den die obertonreichen Frequenzen nach Passieren der Filter annehmen.

Für jede Fußlage sind entsprechend der Registerdisposition des Instruments mehrere Filter (Register des Polyphons) eingebaut. Damit ist die Klangvariation durch die Auswahl von Registern beim Spiel auf dem Polyphon gewährleistet. Durch verschiedene klingende Register in den einzelnen Fußlagen werden die Vorteile der gleichzeitigen Anwendung der additiven und selektiven Klangformung ausgenutzt. Für das Polyphon ergibt sich die gleiche Bedienungsweise, wie sie am Beispiel der Pfeifenorgel erläutert wurde.

Dem Registerteil (Klangformungsteil) folgt im Polyphon stets ein Schweller (Lautstärkeregler in Form eines Fußpedals), dessen Ausgang zum Eingang des angeschlossenen *Niederfrequenzverstärkers* mit seinen Lautsprechern führt. Bisweilen werden zwischen dem Ausgang des Registerteils und dem Schweller oder zwischen dem Ausgang des Tastenkontaktsatzes und dem Registerteil zusätzliche *Vorverstärker* montiert (Trenn- und Ausgangsverstärkerstufen).

Es gibt auch Polyphone, deren Tongeneratoren erst beim Niederdrücken der Klaviaturtasten anschwingen (*Kurztongeneratoren*). Da die Generatoren stets von neuem an-

schwingen, erhält man einerseits die erwünschten Einschwingvorgänge, die zu einem weichen Toneinsatz führen. Andererseits ist es aber schwierig, die Generatoren *mehr-fach* auszunutzen und Chöre zu bilden. An die Dauerton-generatoren des oben beschriebenen Polyphons sind an jeden Generatorausgang mehrere Tastenkontakte entsprechend der vorhandenen Chöre angeschlossen. Diese Zusammenhänge werden in den Abschnitten über technische Einzelheiten zur Konstruktion von Generator- und Kontakt-sätzen näher betrachtet.

Zum Gesamtaufbau größerer Polyphone gehören noch weitere Baustufen, jedoch bleibt das an einem einfachen Polyphon beschriebene Funktionsprinzip, unabhängig von der Größe und Kompliziertheit eines Instruments, stets erhalten.

Von der Kinoorgel her sind mechanische Schlagzeuge bekannt. Sie vervollständigen das Klangbild. Für Polyphone gibt es elektronische Schaltungen, mit denen sich rhythmische Schlageffekte erzeugen lassen. Entweder handelt es sich um einfache *Taktgeber* oder um Schlageffekte, deren Einsetzen von der Spielweise abhängig ist (*Perkussionseffekte*). In letzter Zeit wurden elektronische Schlagzeuge entwickelt, die *vollautomatisch* eine *vollständige* Begleitung zu einer auf einem Polyphon gespielten Melodie-stimme hervorbringen. Neben taktgebenden Schlaginstrumenten werden auch Begleitakkorde in *allen* Ton- und Taktarten wiedergegeben.

Der Klang von Zupfinstrumenten wird im Bass- oder Diskantbereich mit Abklingeffektschaltungen (*Sustain*) erzielt. Da die Schaltungen sehr aufwendig sind, werden oft nur bestimmte Klaviaturbereiche mit Sustaineinrichtungen ausgestattet. Bei elektroakustischen Instrumenten mit Pedal-tastatur wirkt die mit dem linken Fuß allein gespielte Bassbegleitung nicht abgehackt, wenn eine Sustainschaltung eingebaut ist, denn der Abklingeffekt setzt erst nach Loslassen der Tasten ein. Inzwischen kann der nächste Ton ausgelöst werden, der wiederum erst nach Beenden des Tastendrucks langsam verklingt.

Sehr eindrucksvolle Klangbilder entstehen durch *künstliches Verhallen* des Ausgangssignals elektroakustischer Instrumente. Besonders in kleinen Räumen gewinnt das Klangbild an Brillanz. Ein richtig bemessenes Nachhallgerät täuscht die Akustik größerer Räume vor. Die am häufigsten verwendeten Halleinrichtungen mit Spiralfedern (*Federhallgeräte*) erzeugen deutlich hörbare Ein- und Ausschwingvorgänge, die den Instrumenten einen gefälligeren Klang geben. Die Spiralfedern von Federhallgeräten haben jedoch auch *Eigenfrequenzen* im Hörbereich, die sich störend bemerkbar machen. Zusätzliche andere Effekte führen zu einer klanglichen Bereicherung.

*Elektromechanische* Musikinstrumente arbeiten mit Ton-generatorsystemen, die mechanische Schwingungen erzeugen und diese in analoge elektrische Schwingungen umsetzen.

*Vollelektronische* Instrumente (kurz als elektronische Instrumente bezeichnet) weisen Tonerzeuger (Generatoren) auf, zu deren Funktion keine mechanisch schwingenden Teile erforderlich sind. Die elektrischen Schwingungen im Hörbereich entstehen in speziellen elektronischen Rückkopplungsschaltungen.

Die Generatorsätze elektroakustischer Instrumente geben Frequenzen zwischen etwa 30 Hz und 8000 Hz ab. Enthaltene Oberwellen liegen über diesen Frequenzen. Besonders wichtig für die Bildung der Klangfarben der 16'- und 8'-Register ist der Oberwellenbereich bis etwa 3000 Hz.

### 3. Elektroakustische Musikinstrumente

Es gibt gegenwärtig schon so viele verschiedenartige elektroakustische Instrumente, daß man mit ihnen ein Tanzorchester fast vollständig besetzen könnte. Immer wieder erscheinen Neuentwicklungen im Handel. Beim Kauf eines Instruments ist es nicht leicht, die richtige Wahl zu treffen. Die Preisskala reicht von einigen hundert bis zu mehreren tausend Mark. Es ist daher nützlich, die vielfältigen Ausführungen elektromechanischer und vollelektronischer Musikinstrumente kennenzulernen.

#### 3.1. Elektromechanische Instrumente

Die *Arten der Tonerzeugung* kann man bei elektromechanischen Instrumenten wie folgt gliedern:

##### *Abtasten von Zungen oder Saiten*

Durch Anreifen von Zungen oder Saiten werden mechanische Schwingungen erzeugt (*Kurztonschwinger*). Die Zungen oder Saiten tastet man an verschiedenen Stellen mit elektromechanischen Wandlern ab und setzt die mechanischen Schwingungen in elektrische (Tonfrequenzspannung) um. Je nach Lage der Wandler und ihrer Ausführung ergeben sich Tonfrequenzen mit unterschiedlichen Oberwellenanteilen, die von Lautsprechern verstärkt abgestrahlt werden. Einige Instrumente sind mit Filtern zur Klangbeeinflussung ausgerüstet. Zu dieser Gruppe von Instrumenten zählen der *Neo-Bechsteinflügel*, das *Hohner-Cembalet* und *-Pianet* aus vergangenen Zeiten sowie „elektrische Klaviere“ wie auch das in unserer Republik hergestellte *Claviset*.

Man kann die mechanischen Schwingungen auch fortwährend erzeugen (z. B. nach dem Prinzip des Harmoniums

die Zungen durch Luftströme im schwingenden Zustand halten), so daß die Töne bzw. Tonfrequenzspannungen „auf Abruf“ zur Verfügung stehen und mit Tastenkontakten zum Verstärker weitergeschaltet werden können (*Wurlitzer Orgel*).

### *Abtasten von Rotoren*

Es werden *Zahnscheiben* elektromagnetisch oder *Tonscheiben* mit aufgezeichneten Klangkurven fotoelektrisch abgetastet. Die *Hammond*-Orgel arbeitet z. B. mit Zahnscheiben, während die *Welte*-Lichttonorgel mit Tonscheiben aufgebaut wurde.

Beim System *Compton-Dereux* kamen elektrostatische Abtastsysteme zum Einsatz.

### *Übertragung durch Mikrofone*

Elektromechanische Instrumente benötigen zu ihrer Funktion *keine* mechanischen Resonatoren. Die Tonabstrahlung erfolgt nur auf elektrischem Weg über Tonabnehmer, Verstärker und Lautsprecher.

Im Gegensatz dazu tastet man manchmal die Resonanzböden mechanischer Musikinstrumente mit einem Körperschallmikrofon ab. Ihr Klang kann daher mit Lautsprecheranlagen zusätzlich verstärkt wiedergegeben werden. In ähnlicher Weise ließe sich der Klang jedes mechanischen Instruments mit Mikrofonen elektroakustisch übertragen. Derartig ausgerüstete Instrumente gehören nicht zu der Gruppe der elektromechanischen oder elektronischen Musikinstrumente, da ihre Tonerzeugung rein mechanisch erfolgt. Es sind weder elektromechanische noch elektronische Systeme zur Schwingungserzeugung vorhanden.

#### **3.1.1. Polyphon spielbare elektromechanische Instrumente**

Bei dieser Gruppe von Instrumenten entsteht *jeder* Ton durch ein *separates* Tonerzeugungssystem, so daß *mehr*-

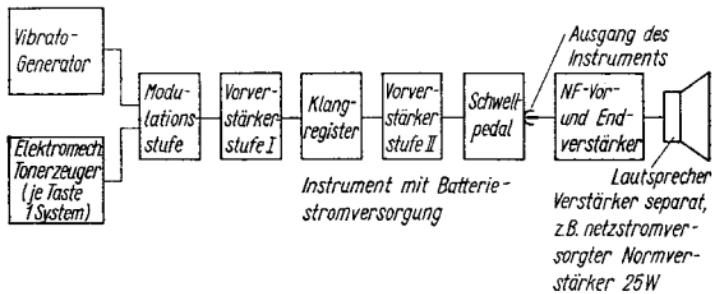


Bild 3.1 Übersichtsschaltplan eines elektromechanischen Instruments mit elektromagnetischen Tonabnehmern (Aufbau entspricht etwa dem *Claviset 200*)

stimmig gespielt werden kann. Die Klangfarbenbildung geschieht additiv (*Hammond*- und *Cahill-Dynamoorgel*), bei anderen Instrumenten wird das Klangbild von den Generatoren vorgegeben, teilweise aber noch selektiv verändert („elektrische Klaviere“, s. Bild 3.1).

### 3.1.2. Hammond- und Lichttonorgeln

Zum Aufbau großer elektromechanischer Instrumente benötigt man mechanische Präzisionsteile. Für den Selbstbau sind sie *nicht* geeignet. Bei *Hammond*-Orgeln werden den Grundtönen *sinusförmige Obertöne* mit regelbarer Intensität beigemischt (reine additive Klangbildung). Dadurch erhält man obertonreiche Schwingungen.

Das Funktionsprinzip von *Hammond*-Orgeln ist außer in der Tonerzeugung dem elektronischen Polyphone und Orgeln ähnlich. Die Konstruktion des Generatorteils lässt keine Verstimming der Töne untereinander zu. Die Generatoren arbeiten mit profilierten Stahlscheiben (elektromagnetisches Prinzip). Sie sind gemeinsam zentrisch auf einer Welle befestigt, die von einem Motor angetrieben wird. Jede der Scheiben erzeugt entsprechend ihrer Zähnezahl einen anderen Ton der Tonskale. Der verwendete Synchronmotor verhindert ungewollte kurzzeitige Drehzahländerungen, die sich als Tönhöhen Schwankungen unange-

nehm bemerkbar machen würden. Es ergeben sich starre Frequenzverhältnisse der Töne zueinander, die das Klangbild mitbestimmen. Auf manche Zuhörer wirken diese starren Frequenzverhältnisse in der Stimmung des Instruments ermüdend. Tatsächlich wird das Klangbild z. B. beim Zusammenspielen mehrerer Streichinstrumente belebt, weil jedes Instrument Töne mit geringen Abweichungen von der Soll-Frequenz abgibt. Die dadurch entstehenden Schwingungen nimmt das Ohr nicht als Verstimmung, sondern als wohltuende Klangfärbung wahr.

Lichttonorgeln sind weniger verbreitet und werden kaum noch gebaut. Ihre Tonerzeugung beruht auf fotoelektrischen Vorgängen. Auf geschwärzte Scheiben aus durchsichtigem Material sind charakteristische Schwingungsverläufe (Klangkurven) aufgezeichnet. Die Scheiben werden in gleichmäßige Drehungen bestimmter Umdrehungszahl versetzt und die Tonspuren mit Lichtstrahlen abgetastet. Die Lichtstrahlen erhalten beim Durchdringen der Scheiben den Formen der Tonspuren entsprechende Intensitätsschwankungen, die von Fotoelementen in analoge Wechselspannungen umgeformt werden und auf diese Weise Tonfrequenzen bestimmter Klangfarben liefern.

Im Ruhezustand einer Lichttonorgel sind alle Lichtstrahlen durch Blenden unterbrochen. Es entstehen keine Tonfrequenzspannungen. Erst beim Betätigen von Tasten werden die Blenden elektromagnetisch geöffnet, so daß die Lichtstrahlen auf die Fotoelemente auftreffen können. Die fotoelektrischen Generatoren geben also nur während der Zeit des Niederdrückens einer Taste Spannungen ab. In der Ausführung der Instrumente gibt es Abarten.

Im äußeren Aufbau gleichen *Hammond*- und Lichttonorgeln elektronischen Polyphonen. Auch die Bedienungseinrichtungen sind einander sehr ähnlich. Vielfach kommen „Schichtschieberegler“ (Flachbahnregler) an Stelle von Drehreglern zur Anwendung, mit denen die Lautstärke der Obertöne eingestellt wird, bevor sie den Grundtönen beigemischt werden. Größere Instrumente weisen alle bekannten Effektschaltungen auf.

## 3.2. Vollelektronische Instrumente

### 3.2.1. Monophone Instrumente mit elektronischer Tonerzeugung

Monophone elektronische Instrumente gibt es in zahlreichen Ausführungen. Ihr Aufbau und ihre Wirkungsweise sind leicht zu verstehen. Industriell wurden sie meist nicht in großen Serien gefertigt. Bekannt ist das *Ätherwelleninstrument*. Es besteht im wesentlichen aus 2 Hochfrequenzgeneratoren, von denen der eine auf einer festen Frequenz, der andere beim Spielen mit sich ändernder Frequenz schwingt. Aus der jeweils auftretenden Differenzfrequenz beider Generatoren ergibt sich die Höhe des im Hörbereich erzeugten Tones (Prinzip des Schwebungsgenerators).

#### *Beispiel*

---

Frequenz des ersten Generators: 300 kHz

Frequenz des zweiten Generators  
(beim Spiel von 300 kHz auf 299 kHz  
verringert): 299 kHz

---

Differenzfrequenz: 1 kHz (1000 Hz)

---

Damit gibt das Instrument einen Ton mit der Frequenz von 1000 Hz ab.

Die Spielweise des Ätherwelleninstruments ist folgende: Der verstimmbare Generator hat eine Stabantenne. Bei Annäherung der Hand an die Antenne kommt es zur kapazitiven Verstimmung des Generators. Mit dem Instrument erzielt man kontinuierliche Tonhöhenänderungen (gleitend von einem Ton zum anderen). Der Spieler muß ein gutes musikalisches Gehör haben, um jeweils die richtige Tonhöhe zu halten. Der Effekt des gleitenden Tones erinnert an Hawaii-Gitarrenklänge.

Ganz ähnlich arbeitet das nach seinem Erfinder *Martenot*

benannte Instrument. *Martenot* führte die Frequenzänderungen des einen HF-Generators durch ein Metallband herbei, indem die zur Gegenelektrode auftretende Kapazität mit Tasten oder durch eine Schiebevorrichtung verändert werden konnte.

Weiterhin sind einfache Instrumente mit nur einem Tongenerator entwickelt worden. Durch das Betätigen von Tasten oder das Niederdrücken eines Widerstandsdrähtes, das etwa dem Spiel auf einem Streichinstrument entspricht, wird die Tonhöhe eines NF-Generators auf die jeweils gewünschte Frequenz gebracht. Durch den Einbau von Frequenzteileln kann statt des Einzeltons auch ein Akkord wiedergegeben werden. Trotzdem ist das Spielen von 2 oder 3 voneinander unabhängigen Stimmen nicht möglich (monophon). Ordnet man aber 2 bis 3 derartige Generatoren verschiedenen Tastaturen zu (je eine kurze Klaviatur für die linke und rechte Hand und eventuell ein Fußpedal), so kann bei unterschiedlich eingestellten Klangfarben mit geringem Aufwand ein beeindruckendes Triospiel verwirklicht werden. Sind noch Frequenzteiler eingebaut, so könnte man eine solche Anordnung als „*Mini-Polyphon*“ bezeichnen.

### 3.2.2. Vollelektronische Polyphone und elektronische Orgeln

Polyphone werden hauptsächlich von Unterhaltungs- und Tanzorchestern eingesetzt. Von den Herstellerfirmen erhielten diese Instrumente teilweise Bezeichnungen wie „*polyphon* spielbares Tastinstrument“ oder „*Transistoren-Orgel*“ oder einfach „*elektrisches*“ bzw. „*elektronisches*“ Musikinstrument mit näherer Typenbezeichnung. Ihre Tastaturen sind gegenüber normalen Orgelklaviaturen oft verkürzt und bei 2manualigen Instrumenten meist auch *gegeneinander versetzt* eingebaut. Bei der *TO 200 (Weltmeister)*, die einmanualig ausgeführt ist, wird eine *Manualteilung* bzw. *Manualtrennung* vorgenommen. Der entstehende *Baß-* und *Diskantbereich* kann unterschiedlich registriert werden (siehe *Harmonium*). Häufig ist bei der

artigen Instrumenten eine Anschlußmöglichkeit für ein zusätzliches Pedal (13 Baßtasten) vorgesehen.

Entsprechend dem Verwendungszweck können manche Kompositionen nur mit Einschränkungen intoniert werden. Für Hausmusik sind die Instrumente gut geeignet. Sie sind den Forderungen beim Vortrag von Tonschöpfungen der leichten Muse durchaus gewachsen.

Die erwähnten Einschränkungen treffen für größere elektronische Orgeln nicht zu. Ihr Tasten- und Tonumfang erlaubt ihre universelle Verwendbarkeit, es sei denn, sie wurden für ganz spezielle Anwendungsbereiche hergestellt. Im kapitalistischen Ausland bemühen sich einige Elektronenorgelhersteller um die Gunst religiöser Kreise. Sie wollen mit dem Bau von elektronischen Instrumenten speziell für sakrale Musik die bisher dazu benutzte Pfeifenorgel ersetzen.

Um die Qualitäten eines Instruments richtig beurteilen zu können, muß man die beigefügten *technischen Daten* verstehen. In der DDR werden technisch und musikalisch sehr anspruchsvolle Instrumente angeboten. Der Käufer muß das Instrument seinen Wünschen und Vorstellungen gemäß auswählen. Auch für die Planung eines Selbstbauinstruments sind in diesem Zusammenhang Kenntnisse erforderlich.

#### Was ist zu beachten?

Als Begleitinstrument in einem Unterhaltungsorchester genügt ein einfaches Polyphon. Für den Einsatz als Solo-instrument (Alleinunterhalter) muß mehr Komfort zur Verfügung stehen. Die Endverbraucherpreise sind in dieser Hinsicht erste Anhaltspunkte. Einfache Instrumente kosten zwischen 2000 Mark und 3000 Mark, größere Ausführungen etwa 5000 bis 6000 Mark und darüber. Trotzdem sollte man lernen, die technischen 'Daten der angebotenen Instrumente zu beurteilen, um richtig einschätzen zu können, was man vom jeweiligen Instrument erwarten kann. Auf eine Spielprobe allein kann man sich nicht stützen, denn der erste Eindruck verleitet zu Fehlentscheidungen.

Folgende Faktoren sind von Bedeutung: Tonansprache, Frequenzumfang, Klangfarben, Bedienungsweise, Wiedergabe verschiedener Spielarten wie legato oder staccato, wobei die Tonansprache beobachtet werden muß, die Spielbarkeit schneller Läufe, Güte und Anzahl von Effekten wie Tremolo, Frequenzvibrato, Perkussion, Sustain und künstlich erzeugter Nachhall, Konstanz der Stimmung und Verstellbarkeit der Gesamtstimmung, Zuverlässigkeit der Kontaktgabe von Tasten, Schaltern und Reglern, Gängigkeit der Tasten und der weiteren Bedienungselemente, mechanische Stabilität des gesamten Instrumentenaufbaus, Störpegel wie Brummen, Zischen und Tonrauschen bei geöffneten Lautstärkeregbern und eingeschalteten Registern (ohne Tonauslösung durch Tastendruck). Man muß jedoch beachten, daß bei Polyphonen und elektronischen Orgeln stets ein gewisser *Störspannungsanteil* vorhanden ist. Das *Tonrauschen* (leise Wiedergabe aller im Generatorteil erzeugten Töne bei voll geöffnetem Lautstärkeregler bzw. Schweller) läßt sich durch geeignete Maßnahmen bei der Konstruktion eines Instruments fast völlig vermeiden. Keinesfalls dürfen die *Fremdspannungskomponenten* so hoch liegen, daß sie im normalen Betrieb des Instruments störend empfunden werden. Extreme Forderungen, z. B. der Anschluß des Instruments an den Mikrofoneingang eines Verstärkers, um den Klang eines Einzelregisters mit einer unnatürlichen, nicht den Raumverhältnissen angepaßten Lautstärke wiederzugeben, müssen entschieden abgelehnt werden. Solche „Prüfmethoden“ entsprechen nicht den Betriebsbedingungen des Instruments, sie sind unsinnig und veranlassen den Unerfahrenen zu einem falschen Urteil.

Schließlich spielen Angaben zur *Klimafestigkeit* eine Rolle, wobei davon ausgegangen werden muß, daß ein Gerät der Unterhaltungselektronik nicht für Feuchtraumklima oder extreme Temperaturen gebaut wird, wenn es in unseren Breitengraden verbleibt. Die Servicefreundlichkeit ist eine Grundforderung bei der Konstruktion eines jeden Geräts, und der Schutz der elektronischen Schaltungen gegen Staub sollte nicht außer acht bleiben.

Gewiß könnte man noch mehr Einzelheiten nennen, jedoch reicht es aus, wenn die erwähnten Faktoren beachtet werden.

Vor allem beim Selbstbau eines Instruments ergeben sich aus der Aufzählung von Eigenschaften, die ein Instrument haben soll, manche Überlegungen. Industriell hergestellte Polyphone erfüllen allgemein die genannten Forderungen recht gut, zumal alle Produzenten vorgeschriebene Parameter einhalten müssen. An billige Erzeugnisse können natürlich nur angemessene Forderungen gestellt werden.

### 3.2.2.1. Kleine Polyphone mit mehreren Registern in gleicher Tonlage

Ein kleines Polyphon hat in der Regel eine  $3\frac{1}{2}$  bis 4 Oktaven umfassende Klaviatur. Es sind nur 8'-Register, jedoch mit ausgeprägten Klangeigenschaften vorhanden. Ein Pedalzusatz mit 13 Tasten und eine Manualtrennung können vorgesehen sein und erhöhen den Gebrauchswert einfacher Instrumente. Frequenzvibrato und Schweller sind selbstverständlicher Komfort. Für eine Klaviatur von C bis  $h^2$  in der Normaltonlage (nur 8'-Register) sind 48 Tongeneratoren erforderlich, wenn, wie hier vorausgesetzt, Akkorde gespielt werden sollen. Der tiefste Ton C schwingt mit 65,4 Hz, der höchste Ton  $h^2$  mit 987,8 Hz. Es handelt sich um obertonreiche Schwingungen, die eine Kontrastreiche selektive Klangformung zulassen. Wegen des zu geringen Tonumfangs des Generatorsatzes lohnt es sich nicht, die additive Klangbildung (Einbau von 4'- oder 2'-Registern) einzubeziehen, denn schon bei einem 4'-Register müßte bei der vorhandenen Anzahl von Tongeneratoren die oberste Oktave *repetiert* werden. Eine dem Wesen nach additive Klangformung ist bei diesen Instrumenten allerdings schon dadurch gegeben, daß sie polyphon gespielt und Akkorde zu Gehör gebracht werden können. Die Konstruktionsvarianten sind zahlreich. Die Tastatur kann z. B. auch mit  $F = 87,3$  Hz beginnen und bei  $e^3 = 1318,6$  Hz enden. Durch den Einbau von Flip-Flop-Schaltungen läßt sich der Frequenzbereich nach unten mono-

phon um eine Oktave vergrößern. Das ist aber nur sinnvoll, wenn mehr hohe Frequenzen, als hier angenommen, im Klangbild erscheinen. Der eben beschriebene Weg wurde bei dem Instrument *EMP 1* (*ionika* mit Röhrenbestückung) beschritten. Das Instrument hat aber Register bis zur 2'-Tonlage.

Zur Klangregelung können Schalter oder Regler dienen. An Stelle von Einzelregistern wird bei kleinen Instrumenten oft ein umfangreiches Filter mit mehreren Reglern verwendet, mit denen sich die Eigenschaften des Filters stark verändern lassen. In den extremen Stellungen der Regler ergeben sich ausgeprägte Klangfarbenunterschiede. Der Materialaufwand für derartige Filterschaltungen ist gering und die Bedienung des Instruments unkompliziert (z. B. *Matador EMP 3*).

### 3.2.2.2. Große Polyphone mit Registern in mehreren Tonlagen

Die Übergänge zwischen kleinen und größeren Polyphonen bis zu großen elektronischen Orgeln sind fließend. Ein größeres Polyphon kann bereits als kleine Elektronenorgel angesprochen werden.

Größere Polyphone haben mindestens eine geteilte Manualklaviatur oder 2 übereinanderliegende Tastenebenen, die manchmal auch zueinander versetzt angeordnet sind. Auf diese Weise lassen sich Tastenkontakte einsparen. Auf der Klaviatur rechts oben wird die Melodiestimme geführt, die andere Klaviatur dient zur Bassbegleitung. Diese Form darf nicht mit Instrumenten verwechselt werden, bei denen die untere Klaviatur zu einem elektromechanischen *Claviset* gehört und nur die obere Tastenreihe zum elektronischen Polyphon. Ein Basspedal sollte wenigstens angeschlossen werden können, wenn es auch nicht mitgeliefert wird. Die Chöre 16', 8' und 4' sind bei einem Manualumfang von insgesamt 4 bis 5 Oktaven vorhanden, ohne daß der 4'-Chor repetiert. Die eventuell eingebauten Register in der 2 $\frac{2}{3}$ '- und 2'-Lage repetieren im Bereich der obersten Oktave. Die Tongeneratoren für die höchsten Töne schwingen

auf Frequenzen zwischen etwa 3000 Hz und 4000 Hz (je nach Lage und Anzahl der Tasten). Für jeden Chor stehen mehrere Register in verschiedenen Lautstärken und Klangfarben zur Verfügung. Eine Ausnahme bildet meist die  $2\frac{2}{3}'$ -Tonlage (Quinte), für sie wird allgemein nur ein Register vorgesehen. In vielen Fällen werden *Kombinationsregister* (fest eingestellte, aus mehreren Chören zusammengesetzte Klangfarben) zur Bedienungserleichterung eingebaut.

Beim heutigen Entwicklungsstand der Elektronik kommen nur noch Instrumente mit Transistoren oder Integrierten Schaltkreisen in den Handel. Für Selbstbauinstrumente ist der Aufbau mit Röhren sehr unökonomisch. Die Endverstärker und die Lautsprecher werden zu den meisten Instrumenten noch getrennt geliefert und aufgestellt. Ausländische Firmen stellen Polyphone und elektronische Orgeln her, in deren Spieltische die Endverstärker und die Lautsprecher eingebaut sind. Die Instrumente wiegen bis zu 150 kp.

Das beste elektronische Instrument kann beim Anschluß an minderwertige NF-Verstärker und Lautsprecher kein voll-

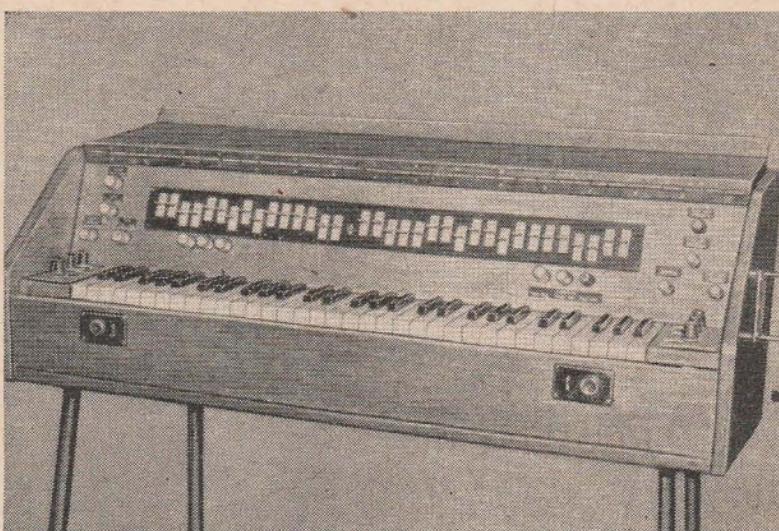


Bild 3.2 Elektronisches Polyphon (Modell K2/3)

endetes Klangbild abgeben. Dagegen kommt ein kleines Instrument an Qualitätsverstärkeranlagen sehr gut zur Geltung.

Als besondere Effekteinrichtungen haben große Polyphone zusätzlich die *Perkussion* (ein klavierähnlicher Schlageffekt mit verschiedenen klanglichen Schattierungen) und den künstlichen Nachhall.

Es ist nicht einfach, die Klangvariationsmöglichkeiten eines Polyphons auszuschöpfen. Bei der relativ großen Anzahl von Einstell- und Regeleinrichtungen wird man erst nach längerer Zeit mit seinem Instrument vollkommen vertraut. Das Leistungsvermögen eines Polyphons wird z. B. an entsprechenden Ständen der Leipziger Messe demonstriert, wenn sie von versierten Orgelspielern vorgeführt werden. Solche Gelegenheiten sollte man nutzen und das Gespräch mit Musikern und Fachleuten suchen.

Bild 3.2 zeigt ein vom Autor entworfenes Polyphon (Modell K2/3), das gemeinsam mit einer Arbeitsgruppe aufgebaut worden ist.

### 3.2.2.3. Elektronische Orgeln

Der Schritt von größeren Polyphonen zu „Elektronenorgeln“ ist nur klein. Gegenüber der technischen Grundkonzeption eines Polyphons sind bei elektronischen Orgeln in erster Linie nur die einzelnen Baugruppen erweitert. Mehr als 2 Manuale sind selten vorhanden. Sie umfassen 5 Oktaven von C bis h<sup>3</sup>. Der *klingende Tonumfang* beträgt kaum weniger als 8 Oktaven, z. B. von C<sub>1</sub> bis h<sup>5</sup> (32,7 Hz bis 7902,4 Hz auf a<sup>1</sup> mit 440 Hz bezogen). Die Chöre reichen im Normalfall von 16' bis maximal zum 1' hinauf. Register mit höheren Fußlagen als 1' bringen keinen wesentlichen Gewinn an Klangqualität.

Das Basspedal zählt meist 30 Tasten von C bis f<sup>1</sup>. Die Gesamtregisterzahl der Instrumente liegt etwa zwischen 40 und 60 einschließlich der Klangkombinationen (Mixturregister). Die Angaben beziehen sich stets auf *normal* ausgeführte Instrumente.

Das Instrument sollte mit allen musikalisch und spieltechnisch *wertvollen Effekten* und *Spielhilfen* ausgerüstet sein (s. Abschnitt 6.5.3.).

Der Gesamtaufbau elektronischer Orgeln wird leichter erfaßt, wenn das Wissen über Polyphone ausreichend gefestigt ist. Bei der *Bauplanung* von Elektronenorgeln muß einkalkuliert werden, daß jede *Erweiterung*, z. B. der Einbau eines weiteren Manuals, einen *Mehraufwand an Arbeit* mit sich bringt. Der Mehrverbrauch von Material ist weniger ausschlaggebend.

Über den Selbstbau großer Polyphone und elektronischer Orgeln wird noch ausführlich berichtet. Solche Bauvorhaben können am besten von *Arbeitsgemeinschaften* bewältigt werden, denn ein auf sich allein gestellter Amateur benötigt dazu 2 bis 3 Jahre. Zeitraubend, aber auch interessant und freudespendend sind bereits Überlegungen, konstruktive Vorversuche und die Anfertigung von Zeichnungen, auf die man bei so umfangreichen Projekten nicht verzichten kann. In den Abschnitten zum Entwurf und Bau von Polyphonen wird diese Problematik besprochen, um dem am Selbstbau Interessierten Wege zur

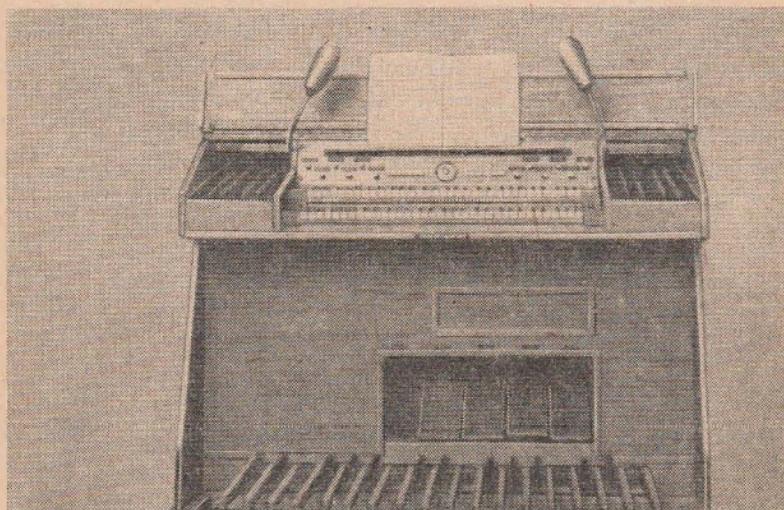


Bild 3.3 Elektronische Orgel (Modell K1)

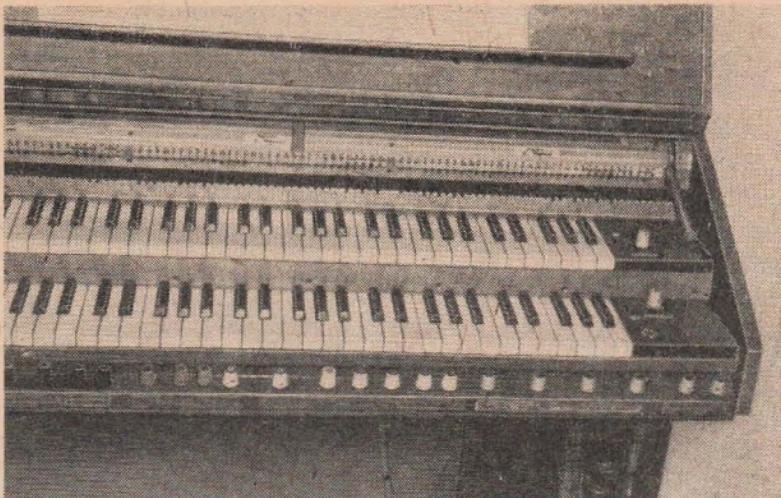


Bild 3.4 Teilansicht der elektronischen Heimorgel (Modell K4)

Arbeitseinsparung aufzuzeigen und ihn vor Fehlschlägen zu bewahren.

Bild 3.3 zeigt die erste vom Autor entworfene große elektronische Orgel (Modell K1). Sie wurde gemeinsam mit Lehrlingen und Kulturgruppenmitgliedern gebaut. In Bild 3.4 sieht man Ausschnitte eines ähnlich ausgeführten Instruments (Modell K4). Gegenüber dem Instrument K1 wurden bei der elektronischen Heimorgel K4 vor allem die Abmessungen des Spieltisches verkleinert. Obwohl die Tastenkontaktesätze mit mehr Kontakten ausgerüstet wurden, nehmen sie weniger Platz in Anspruch als beim Modell K1. Das trifft auch noch für andere Baugruppen des Instruments K4 zu. Teure Spielhilfen wurden einfacher aufgebaut, weggelassen oder durch andere ersetzt. Das Modell K4 weist z. B. keine freien, sondern mehrere feste Klangkombinationen auf. Durch jede feste Klangkombination werden zur Klangfarbenbildung bestimmte Register eingeschaltet. Sie können auf Wunsch einzeln wieder aus- und andere Register hinzugeschaltet werden. Dadurch lässt sich der Klang einer eingeschalteten festen Kombination noch während des Vortrags eines Musikstückes verändern. Der Schaltmechanismus der festen Kombinationen wurde

so ausgeführt, daß sich die Register für die Kombinationen jederzeit mit wenigen Handgriffen neu zusammenstellen lassen, nachdem man sie vorher ausgewählt hat.

Oft wird gefragt, warum industriell hergestellte größere elektronische Musikinstrumente sehr teuer sind. Zunächst müssen die *Entwicklungskosten*, die für umfangreiche Instrumente nicht gering sind, genannt werden. Hinzu kommen die Kosten für *technologische Einrichtungen* zur Herstellung von Blech- und Kunststoffteilen. Ausschlaggebend sind die verhältnismäßig *niedrigen Stückzahlen* der zu fertigenden großen Instrumente.

Alle Kosten müssen auf das einzelne Stück eines Erzeugnisses umgeschlagen werden. Bei Großserien entfallen nur kleinere Kostenanteile auf das einzelne Erzeugnis. Da der Bedarf an großen Instrumenten begrenzt ist, ergeben sich zwangsläufig hohe Stückpreise. Selbst unter den Bedingungen einer industriellen Fertigung treten beim Bau der Instrumente mehr manuelle Arbeiten auf als bei vielen anderen Erzeugnissen. Außerdem darf die Industrie im Gegensatz zum Amateur nur klassifizierte Bauelemente verwenden, die mehr kosten als Basteltransistoren und sonstiges vom Amateur verwendetes Material. Aus diesen Zusammenhängen leiten sich die hohen Preise großer Polyphonic und elektronischer Orgeln ab.

## 4. **Vorzüge und Nachteile elektroakustischer Musikinstrumente**

Für den Bau großer mechanischer Instrumente, z. B. Kinoorgeln, werden Tonnen wertvollen Materials benötigt. Die Instrumente nehmen in Theatern und Festälen viel Raum in Anspruch. Sie sind bis auf den Spieltisch, der bei elektrischen Trakturen um einige Meter verschoben werden kann, ortsfest installiert (bei elektrischen Trakturen erfolgt die Steuerung der Pfeifenventile u. a. vom Spieltisch aus *nur über flexible Kabelverbindungen*). Beim Niederdrücken von Klaviaturtasten oder beim Einschalten von Registern öffnen *Elektromagnete* die Ventile. Trotzdem handelt es sich um mechanische Instrumente, weil zur Tonerzeugung weder elektromechanische noch elektronische Generatoren verwendet werden).

Große elektroakustische Instrumente wiegen maximal nur *einige hundert Kilopond* einschließlich der Verstärker und Lautsprecherboxen oder Schallwände. Die Veränderung ihres Standorts in Räumen oder ihr Transport bereitet keine größeren Schwierigkeiten. Die Stromversorgung kann in besonderen Fällen aus Batterien oder transportablen, mit Benzinmotoren angetriebenen Generatoren erfolgen. Der Betrieb elektroakustischer Instrumente ist somit unabhängig von Netzanschlüssen. Nur die Leistungsverstärker (Endstufen) haben einen höheren Stromverbrauch, die Polyphon- und Orgelschaltungen allein können aus Taschenlampenbatterien gespeist werden. Davon wird sogar bei industriellen Instrumenten Gebrauch gemacht. Wegen der geringen Stromaufnahme der Polyphone (ohne Endverstärker) könnten stets kleine *stabilisierte Netzteile* eingebaut werden, um den regelmäßigen Batteriewechsel zu vermeiden. Einige Instrumente lassen sich von Netz- auf Batteriestromversorgung umschalten.

Das Lautstärke- und Klangvolumen einer herkömmlichen Kinoorgel ist gewaltig. Beispiele beweisen aber, daß mit

den in Lichtspielhäusern aufgestellten Polyphonen bzw. Elektronenorgeln klanglich noch mehr geboten werden kann. Bei ausreichender *Ausgangsleistung* (Sprech- oder Musikleistung) der Verstärker und mit hochwertigen Lautsprecherboxen oder großen Schallwänden lassen sich Klangbilder hervorbringen, die dem Klang von Pfeifenaggregaten nicht nachstehen. Entscheidend ist immer wieder die *Qualität* der elektroakustischen Übertragungsanlage.

In Räumen mit Pfeifenorgeln werfen Umbauarbeiten (Modernisierung älterer Bauten) oft große Probleme auf. In vielen Fällen entschloß man sich zum Abbruch der Instrumente, wenn sie schon zu baufällig waren oder keinen historischen Wert besaßen. Es wurden elektroakustische Instrumente und Einrichtungen eingebaut, die sich leichter den vorhandenen räumlichen und akustischen Gegebenheiten anpassen ließen.

Erweiterungen und Umbauarbeiten an elektroakustischen Instrumenten und deren Übertragungsanlagen sind ebenfalls wesentlich einfacher auszuführen als Veränderungen an einer Pfeifenorgel. Die Technik der Erzeugung elektronischer Klänge entwickelt sich weiter, so daß man heute schon ältere Polyphone z. B. mit elektronischen Schlagzeugen oder anderen Effektschaltungen nachrüstet.

Elektroakustische Instrumente und Übertragungsanlagen für hohe Ansprüche und große Räume sind teuer, sie sind aber wesentlich billiger als Kinoorgeln mit annähernd gleichen musikalischen Ausdrucksmöglichkeiten. Die zur Übertragung elektroakustischer Instrumente angeschafften Anlagen lassen sich außerdem noch für die Wiedergabe von Schallplatten- und Tonbandaufnahmen sowie von Mikrofonübertragungen verwenden. Diese Gesichtspunkte führen sicher zu der Erkenntnis, daß für die Darbietung von Unterhaltungsmusik aus ökonomischen Erwägungen und wegen der größeren Variationsmöglichkeiten sowie ihrer vielseitigeren Verwendbarkeit besser *elektroakustische* Musikinstrumente und Anlagen angeschafft werden sollten. Zur Aufführung klassischer und historischer Werke (Kompositionen für Konzertorgel, Cembalo oder Klavier, teil-

weise mit Orchester) ist der Einsatz mechanischer Musikinstrumente selbstverständlich; denn die Werke werden stilgerecht, der Epoche ihrer Entstehung entsprechend dargeboten. Deshalb baut man z. B. noch heute in Konzertsäle große *Pfeifenorgeln* ein, und sogar in den modernen Aufnahmeräumen der Rundfunkstudios sind sie zu finden.

Der Trend beim Bau elektronischer Instrumente ist nicht darauf gerichtet, den Klang mechanischer Instrumente zu *imitieren*. Außerdem ist nicht erwiesen, ob Menschen mit einem geschulten musikalischen Gehör nicht immer wieder Unterschiede zwischen elektronisch und mechanisch erzeugten Klängen feststellen würden. Die Forschung und Entwicklung arbeitet auf dem Gebiet der elektronischen Ton- und Kangerzeugung weiter.

Wie während der letzten Jahrzehnte z. B. bei Geräten der Unterhaltungselektronik Fortschritte erzielt wurden, die nicht exakt vorausgesagt werden konnten, so weiß auch heute niemand genau, welche Veränderungen bei elektroakustischen Instrumenten zu erwarten sind. Fest steht, daß es auch bei ihnen zu keinem Stillstand in der Entwicklung kommen wird.

Mit der Größe der elektroakustischen Instrumente wächst die Anzahl der eingebauten elektronischen Bauelemente. Wie die Erfahrungen beweisen, steigt dadurch die Reparaturanfälligkeit der Instrumente aber kaum an. Fehlerhafte Bauelemente fallen meist schon in den ersten Betriebsstunden aus. Transistorisierte Schaltungen in elektroakustischen Instrumenten nehmen in der Mehrzahl nur geringe elektrische Leistungen auf. Die Bauelemente werden wenig belastet, es können kleine und leichte Bauelemente eingebaut werden. Die Betriebsspannungen transistorisierter Baugruppen betragen in der Regel unter 20 V.

Die Halbleitertechnik ermöglicht gegenwärtig den Bau von Instrumenten, die einen höheren Gebrauchswert, ein geringeres Volumen und Gewicht sowie höhere mechanische Stabilität als röhrenbestückte Instrumente aufweisen. Durch die Weiterentwicklung der Halbleitertechnik und durch den Einsatz Integrierter Schaltkreise können besonders kleine

und sehr leichte Instrumente gebaut werden. Der Selbstbau von Polyphonen ist einfacher, wenn Bausteine in IS-Technik zur Verfügung stehen und verwendet werden, auch wenn die Selbstbaukosten beim Einsatz Integrierter Bau-  
stufen zunächst etwas höher liegen.

## 5. Normen im Musikinstrumentenbau

Berufsmusiker üben und konzertieren täglich mehrere Stunden auf ihren Instrumenten. Das ist eine Schwerarbeit, die durch eine sinnvolle konstruktive Gestaltung der Bedienungselemente der Instrumente erleichtert werden muß. Vorzeitiges Ermüden bei der Handhabung der Instrumente darf keinesfalls eintreten.

Im Laufe der Zeit haben sich für jede Instrumentenart Formen herausgebildet, die auch vom spieltechnischen Standpunkt aus stets eingehalten werden müssen; denn ein Musiker kann nicht laufend umlernen, wenn er sich z. B. wiederholt ein neues Instrument der gleichen Art anschafft.

Bei Tasteninstrumenten mit mehreren Bedienungselementen gelten Normen vorzugsweise nur für Klaviaturen. Die Anordnung der übrigen Bedienungseinrichtungen bleibt dem Konstrukteur überlassen. Zwar haben sich in der Praxis einige Grundregeln für die Anordnung der Bedienungselemente herausgebildet, jedoch werden sie beim Bau elektroakustischer Instrumente nicht streng befolgt.

Stets muß davon ausgegangen werden, mit möglichst *wenig* Bedienungsknöpfen, -schaltern, -wippen u. ä. auszukommen. Trotzdem bleibt bei großen Instrumenten ihre Anzahl beträchtlich.

In diesem Fall kommt es auf eine *zweckmäßige* und *übersichtliche* Anordnung der Bedienungselemente an, vor allem derjenigen, die *während* des Spielens am häufigsten betätigt werden müssen. In Zweifelsfällen richtet man sich beim Selbstbau nach vergleichbaren industriellen Erzeugnissen oder zieht einen Fachmann zu Rate.

Maße können den Zeichnungen entnommen werden, die in den Abschnitten zum Entwurf und Bau von Instrumenten angegeben sind.

An größere elektroakustische Instrumente werden folgende Anforderungen gestellt:

Grundtonbereich von 40 bis 3200 Hz,  
Obertonbereich bis 8000, möglichst bis 12 000 Hz,  
Durchführbarkeit aller Spielarten (Anschlagarten u. a.),  
Klangfarbenbildung durch Tonblenden, Veränderungen einzelner Obertöne, Formantverschiebung,  
kontinuierliche Lautstärkeregelung (Schweller),  
Tremolo und Vibrato regelbar,  
Wiedergabe von 8 bis 10 Tastenanschlägen in der Sekunde.

Weitere Angaben wurden schon in Abschnitt 3.2.2. gemacht.

## **6. Technische Grundkenntnisse zum Verständnis des Aufbaus und der Wirkungsweise elektroakustischer Musikinstrumente**

Viele Einzelheiten mechanischer Instrumente wurden bei der Entwicklung elektroakustischer Instrumente übernommen oder dem neuen Verwendungszweck entsprechend umkonstruiert.

Die äußere Gestaltung, Abmessungen, Elemente der Tastenmechanik und Bedienungseinrichtungen sind im Prinzip unverändert beibehalten worden. Kontaktkonstruktionen, die sich bei elektrisch gesteuerten Pfeifenorgeln bewährt haben, werden mit geringfügigen Abwandlungen auch bei elektronischen Instrumenten erfolgreich eingesetzt.

Die im Musikinstrumentenbau angewendete Elektronik ist grundsätzlich nicht neu. Die Verdrahtungstechnik von Polyphonen beruht teilweise auf den Gesetzmäßigkeiten der Harmonielehre und richtet sich nach den Funktionsprinzipien des jeweiligen Instruments.

Im engen Rahmen dieser Broschüre können physikalische Grundlagen und die Wirkungsweise elektronischer Grundschaltungen nicht ausführlich behandelt werden. Es ist beabsichtigt, vor allem die *funktionellen Verknüpfungen* der Baustufen kleinerer und größerer Instrumente zunächst an Übersichtsschaltplänen zu erläutern. Elementarwissen und Kenntnisse über den Aufbau und die Wirkungsweise der einzelnen Grundschaltungen kann man sich aus Fachbüchern aneignen, von denen nur einige genannt sind: [2], [3], [7], [12], [13], [14], [16], [19], [21], [23].

Mit den Anleitungen in den weiteren Teilen wird es technisch nicht vorgebildeten Lesern zwar gelingen, funktionsfähige Schaltungen und Instrumente aufzubauen, jedoch bleibt es Laien, ohne daß sie weitere Literatur studieren, versagt, tiefer in die interessanten Einzelheiten elektronischer Abläufe einzudringen. Fehlende Grundkenntnisse führen bei der Fehlersuche und beim Beleben funktionsgestörter Schaltungen zu unsystematischer Arbeitsweise. Ge-

wiß wird man mit unqualifiziertem Probieren und mit viel Zeitaufwand (Auswechseln von Bauelementen und Überprüfen der Leitungsverbindungen usw.) Fehler finden, es kann aber bei diesem Vorgehen auch passieren, daß Bauelemente zerstört werden. Bei aufmerksamer und gewissenhafter Einhaltung der Anleitungen unterlaufen zwar kaum Schaltfehler, und die elektronischen Baugruppen funktionieren oft schon bei der ersten Inbetriebnahme, doch befriedigt ein solcher Arbeitsstil nicht.

Wenn es die Zeit erlaubt, sollte man immer versuchen, sein theoretisches Grundwissen zu fundamentieren und zu erweitern, um nicht ahnungslos herumbasteln zu müssen. Das beigefügte Bildmaterial verbessert die Verständlichkeit des Textes und fördert das Vorstellungsvermögen. Trotzdem sollte jede Gelegenheit zur Besichtigung von elektroakustischen Musikinstrumenten genutzt werden.

Vielleicht gibt es in der Nähe Vertragswerkstätten für elektroakustische Musikinstrumente, wo ein Blick in geöffnete Instrumente geworfen werden kann. Vielfach beantworten die anwesenden Fachleute sogar bereitwillig die Fragen eines Amateurs. Der am Stoff Interessierte wird selbst noch andere Wege finden, um sich zu informieren. Das alles gewinnt um so mehr an Bedeutung, je tiefer der dargebotene Stoff in technische Einzelheiten eindringt.

## 6.1. Übersichtsschaltpläne einfacher Instrumente

In Übersichtsschaltplänen werden Bau- oder Funktionsgruppen nur *symbolisch* als umrandete rechteckige Flächen gezeichnet.

Die Übersichten zeigen die *Verknüpfungen* von Baugruppen und ihre Anordnung im Gesamtschaltplan. Um einen Einblick in die *funktionellen Zusammenhänge* zu vermitteln und *Signalwege* zu markieren, werden häufig Richtungspfeile (Signalflusswege) angegeben. Das wird jetzt an den Übersichtsschaltplänen einiger bekannter Instrumente gezeigt.

## Elektrogitarren

Auf den Resonanzkörpern (für rein elektroakustische Wiedergabe nicht erforderlich) unmittelbar unter den Saiten der Gitarren sind magnetische Tonabnehmersysteme angebracht. Tonabnehmer gibt es in unterschiedlichen Ausführungen. Äußerlich erkennt man meist nur metallische Flächen. Die Systeme sind mit Justierschrauben versehen, um die Schwingungen der einzelnen Saiten im richtigen Lautstärkeverhältnis zueinander abnehmen zu können. Da es für den Klang einer Elektrogitarre nicht gleichgültig ist, an welcher Stelle die Saiten abgetastet werden, gibt es auch Instrumente mit mehreren Tonabnehmergruppen, die an verschiedenen Stellen unter den Saiten liegen.

Wie aus Bild 6.1 zu ersehen ist, gelangen die von den Tonabnehmersystemen erzeugten Tonfrequenzspannungen zu Klang- und Lautstärkeregbern, die ebenfalls mit im Körper des Instruments untergebracht wurden. Die Glieder zur Klangbeeinflussung sind fest eingestellt (Filterschaltungen) und die Ausgangsspannungen der Filter *stetig* regelbar (von außen bedienbare Reglerknöpfe). Übliche Schaltungsabarten findet man bei allen Instrumenten.

Der Ausgang des Instruments ist *einkanalig*, d. h., die Ausgangsspannungen der einzelnen Filter werden zusammengeführt und ausgekoppelt (Summensignal). Die Tonfrequenzen gelangen über eine *abgeschirmte* Leitung (eine von einem Metallgeflecht umgebene isolierte Litze) an den Eingang eines Niederfrequenzverstärkers. Auch der TA-Eingang (Tonabnehmer) eines Rundfunkgeräts kann benutzt werden. Die Wiedergabequalität hängt vor allem von der Qualität des Verstärkers und der Lautsprecher ab.

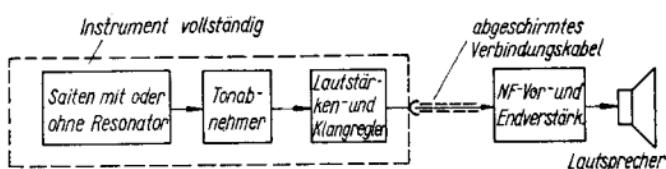


Bild 6.1 Übersichtsschaltplan einer Elektrogitarre mit elektromagnetischem Tonabnehmersystem

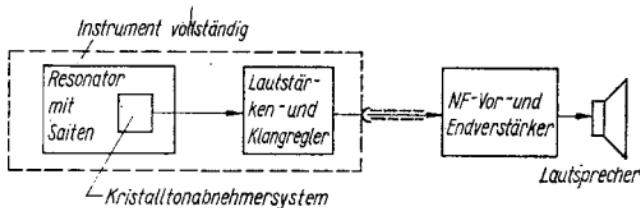


Bild 6.2 Übersichtsschaltplan einer Gitarre mit Kristalltonabnehmersystem auf dem Resonanzboden

Der Übersichtsschaltplan Bild 6.2 zeigt eine Elektrogitarre mit einem auf dem Resonanzboden montierten Kristalltonabnehmer, der die Schwingungen des Resonanzkörpers in Tonfrequenzspannungen umsetzt. In diesem Zusammenhang sollten die Bemerkungen in Abschnitt 3.1. beachtet werden.

### *Elektromechanische Baßinstrumente*

In den vergangenen Jahren erschienen verschiedene kleine handliche Baßinstrumente mit Tasten im Handel, z. B. der *Combo-Baß* mit elektromechanischen Tonerzeugungssystemen. Ein Resonator ist nicht vorhanden. Das Instrument hat Klaviertasten, läßt sich polyphon spielen und klingt etwa wie ein Zupfbaß. Beim Niederdrücken von Tasten werden kleine Metallzungen angerissen, die Bestandteile der elektromagnetischen Tonabnehmersysteme sind. Durch das mechanische Schwingen der Zungen (gedämpfte oder abklingende Schwingungen) kommt es zur elektromagnetischen Induktion analoger Wechselspannungen in den Tonabnehmersystemen (Tonfrequenzspannungen der elektromechanischen Generatoren). Die Töne sind oberwellenreich, sie werden nach Bild 6.3 in ähnlicher Weise weiterverarbeitet, wie das bei Elektrogitarren beschrieben wurde. Sind Klangfilter eingebaut, so werden Vorverstärkerstufen benötigt, die die dämpfende Wirkung der Filter und damit den Verlust an Tonfrequenzspannungen wieder ausgleichen.

Das schon erwähnte *Claviset*, eine Art elektroakustisches Klavier, arbeitet nach dem gleichen Prinzip, nur weist es

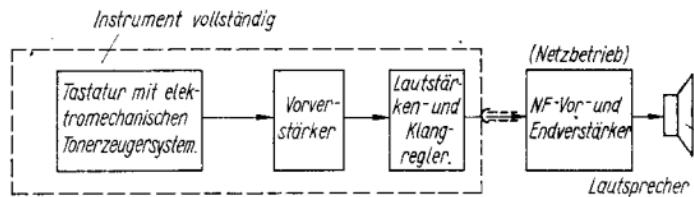


Bild 6.3 Übersichtsschaltplan eines elektromechanischen Baßinstruments (entspricht etwa dem *Combo-Baß Basset*)

mehr Tasten und eine dementsprechende Anzahl von Tonabnehmersystemen auf (je Taste ein System). Es sind mehrere mit Wippenschaltern zu betätigende Register vorhanden (Modell 200). Das *Claviset 300 (Weltmeister)* hat keine Register, es ist praktisch nicht anders als der *Combo-Baß* (auch *Basset* genannt) aufgebaut.

Der Klang dieser Instrumente erinnert je nach Einstellung an Cembalo, Spinett und Hammerklavier. Im Ausgang der Instrumente liegt stets ein Schweller zur Lautstärkeregelung. Der Übersichtsschaltplan der *Claviset*-Modelle entspricht dem des Bildes 6.1.

### Ätherwelleninstrument

Bild 6.4 zeigt das in Abschnitt 3.2.1. erwähnte Ätherwelleninstrument. Es ist eines der wenigen Musikinstrumente, in denen Hochfrequenzoszillatoren vorkommen.

In den beiden HF-Oszillatoren folgenden *Modulationsstufe* wird die benötigte Niederfrequenz aus der *Differenz* der beiden HF-Schwingungen gewonnen. Es folgt ein *Tiefpaß*, ein Filter, das die Aufgabe hat, hohe Frequenzen zu

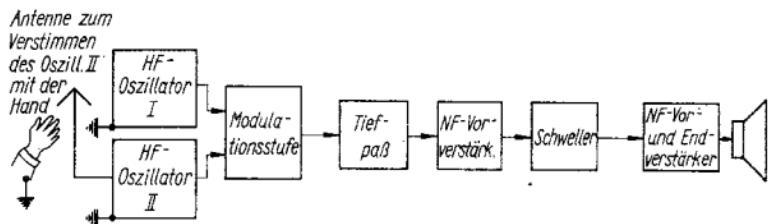


Bild 6.4 Übersichtsschaltplan eines Ätherwelleninstruments

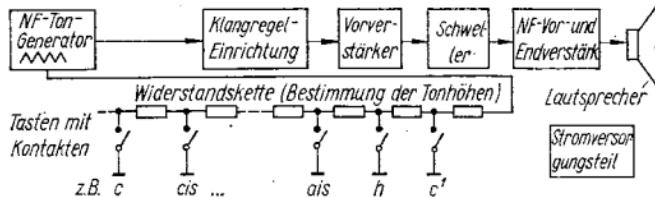


Bild 6.5 Monophones elektronisches Tasteninstrument mit selektiver Klangformung (schematisch)

sperren und die Niederfrequenzen (Schwingungen im Hörbereich) passieren zu lassen. Die NF-Spannungen werden dann zum Vor- und Endverstärker weitergeleitet. Zwischen die Verstärkerstufen legt man einen Schweller, der eine ausdrucksvolle Tonwiedergabe ermöglicht. Das Instrument eignet sich als *Effektklangerzeuger*.

#### *Monophones elektronisches Tasteninstrument mit selektiver Klangformung*

Das Instrument weist nach Bild 6.5 bereits technische Grundzüge eines Polyphons auf. Da aber nur *ein* Tongenerator zur Verfügung steht, muß er durch die Tasten auf die jeweils richtige Frequenz umgeschaltet werden. Es kann daher jeweils nur *ein* Ton wiedergegeben werden. Das geschieht mit der in Bild 6.5 angedeuteten Widerstandskette. Beim Betätigen zweier oder mehrerer Tasten kann stets nur der Ton erklingen, dessen Tastenkontakt dem Generator schaltungsmäßig am nächsten liegt. Der Generator schwingt erst beim Schließen eines Tastenkontakts an (*Kurztongenerator*). Für den Toneinsatz ist der entstehende Einschwingvorgang weicher als bei einem Dauertongenerator, der die Tonfrequenzspannungen im voraus erzeugt, so daß sie von den Tastenkontakten nur noch zum Klangformungsteil durchgeschaltet werden. Allerdings bedient man sich beim Dauertonverfahren anderer Mittel, um einen nicht zu harten Toneinsatz zu erhalten.

Der Generator gibt obertonreiche Schwingungen ab (z. B. sägezahnförmige), die im Klangformungsteil gefiltert wer-

den. Die Filter heben die Spannungen bestimmter Oberwellen an oder senken sie ab. Damit läßt sich der Klang der einzeln erzeugten Töne stark verändern. Ein Schwellen und ein Verstärker mit einem Lautsprecher sind vorhanden.

Der Einbau von Effekteinrichtungen wäre ohne Schwierigkeiten möglich, jedoch nicht lohnend, weil die Schaltungen umfangreicher als die des gesamten Grundinstruments ausfallen würden.

Die Schaltung eines solchen Instruments ist mehr zur Demonstration geeignet, um den Leser an technische Zusammenhänge heranzuführen, denn die Eigenschaften des zu einfachen Instruments befriedigen seinen Erbauer und die Zuhörer sicher nur für kurze Zeit.

#### *Monophones elektronisches Tasteninstrument mit 2 Frequenzteilern zur Klangbildung*

Durch den Einbau von Frequenzteilern in das Instrument nach Bild 6.5 entsteht ein monophones Instrument, das statt einzelner Töne Dreiklänge abgibt. Mit 2 Teilerstufen erklingen auf jeder Taste stets 3 Töne im Oktavabstand, die unterschiedlichen Filtern im Klangformungsteil zugeführt werden können. Eine der Teilerstufen ließe sich z. B. auch so auslegen, daß eine Quinttonlage entsteht. Damit wird aber kein 2- oder mehrstimmiges Spiel ermöglicht (z. B. 3 voneinander unabhängige Melodien — Trio); denn beim Niederdrücken mehrerer Tasten sind jeweils wieder nur 3 Töne mit vorgegebenem Tonabstand zu

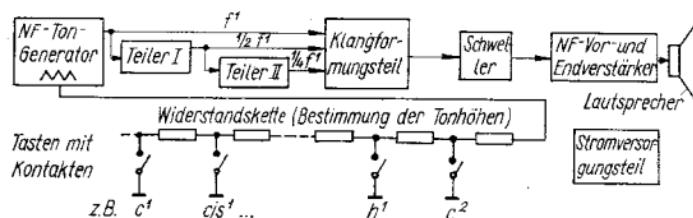


Bild 6.6 Monophones elektronisches Tasteninstrument mit 2 Frequenzteilern und selektiver Klangformung (schematisch)

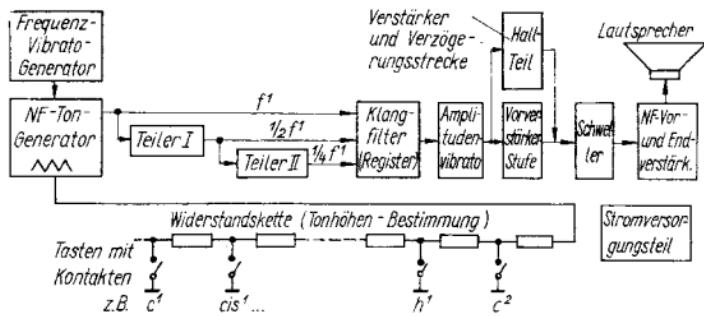


Bild 6.7 Das Instrument nach Bild 6.6, zusätzlich mit Klangeffektschaltungen ausgerüstet (schematisch)

hören, die dem höchsten Ton der betätigten Taste zugeordnet sind.

In Bild 6.7 wurde der Übersichtsschaltplan nach Bild 6.6 durch den Einbau von Effektschaltungen erweitert (Frequenzvibrato, Amplitudenvibrato oder Tremolo und Halleinrichtung).

Das klangschöne *Frequenzvibrato* entsteht, indem man die Frequenz des NF-Generators mit der Frequenz eines *Sinusgenerators* (3 bis 10 Hz) wobbelt (s. Bild 6.8).

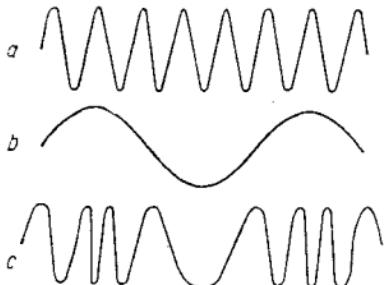


Bild 6.8 Entstehung des Frequenzvibratos (Amplitude konstant, Frequenz schwankend).

Kurve a ist die unmodulierte Tonfrequenzspannung, die mit der in b gezeigten vom Vibratogenerator erzeugten sinusförmigen Modulationsfrequenz (Vibratofrequenz etwa 2 bis 10 Hz – Schnelligkeit des Vibratos) gewobbelt (frequenzmoduliert) wird, so daß sich der in c gezeichnete Kurvenverlauf ergibt. Die Tonhöhe schwankt regelmäßig und stufenlos um die mittlere Tonfrequenz. Die Frequenzänderungen (Vibratostärke) wachsen mit steigender Amplitude der Modulationsfrequenzspannung (Kurve b)

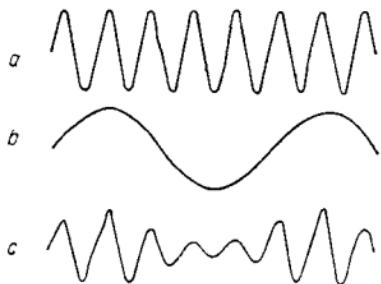


Bild 6.9 Tremolo, oft als Amplitudenvibrato bezeichnet (Frequenz konstant, Amplitude schwankend).

Kurve a zeigt die unmodulierte Tonfrequenzspannung, die durch die Modulationsfrequenz (Vibratofrequenz) der Kurve b amplitudenmoduliert wird, so daß sich der Kurvenverlauf c ergibt. Die Amplitudenschwankungen verlaufen entsprechend dem Kurvenzug b kontinuierlich und wiederholen sich in zeitgleichen Abständen. Je höher die Spannung der Modulationsfrequenz wird, um so mehr schwanken die Amplituden der Tonfrequenzspannung (der Modulationsgrad steigt an, das Tremolo bildet sich kräftiger aus). Bei zu hohem Modulationsgrad hört man ein impulsartig zerrissenes Tonfrequenzsignal (Mandolineneffekt)

Wird das Ausgangssignal des Klangformungsteils über einen *Fotowiderstand* geleitet und *Lichtimpulsen* ausgesetzt, so verändert sich der Widerstand des Fotowiderstands im Rhythmus der Lichtimpulse; am Eingang des nachfolgenden Vorverstärkers tritt eine mit der Folgefrequenz der Lichtimpulse schwankende Tonfrequenzspannung — das *Amplitudenvibrato* — auf. Der Schwingungsverlauf einer amplitudenmodulierten Tonfrequenzspannung ist in Bild 6.9 dargestellt. Das Flackern der Lampe (die Entstehung der Lichtimpulse) kann man am einfachsten mit einem *Blinkgeber* (Multivibrator) herbeiführen.

Zur Erzeugung des *Nachhalls* wird das normale Signal am Eingang einer Vorverstärkerstufe abgegriffen und einer parallelgeschalteten Halleinrichtung zum Verhallen zugeführt. Die gegenüber dem Normalsignal am Ausgang des Hallverstärkers zeitverzögert und nachschwingend auftretenden NF-Signale setzt man dem Normalsignal am Eingang der folgenden Vorverstärkerstufe wieder hinzu. Die zur Halleinrichtung parallelgeschaltete Vorverstärkerstufe wirkt als *Trennstufe* zwischen dem Ein- und dem Aus-

gang der Halleinrichtung. Dadurch werden der Ein- und der Ausgang der Halleinrichtung gegeneinander *entkoppelt*, denn die Vorverstärkerstufe verhindert Rückkopplungserscheinungen, die zum anhaltenden Pfeifen der Anlage führen würden. Rückkopplung liegt vor, wenn z. B. Ausgangsspannungen eines Verstärkers auf seinen Eingang zurückgeführt werden. Der Begriff *Rückkopplung* wird später noch ausführlicher erklärt.

## 6.2. Elektromechanische Systeme zur Tonerzeugung

Zu einem elektromechanischen Tonabnehmersystem gehören *mechanisch bewegte* Teile und ein *Wandler*, der mechanische Schwingungen in analoge elektrische Schwingungen (Wechselspannungen bzw. Tonfrequenzspannungen) umformt.

Es kommen vorwiegend elektromagnetische, elektrodynamische und piezoelektrische Systeme, wie sie in ähnlicher Form auch in elektrischen Tonabnehmern moderner Plattenspieler, in Mikrofonkapseln, Federhallstrecken und Lautsprechern eingebaut sind, zum Einsatz. Diese elektroakustischen Wandler haben die Aufgabe, mechanische Schwingungen, darunter auch die der Luft, in elektrische umzuwandeln oder umgekehrt (z. B. Lautsprecher).

### 6.2.1. Elektromagnetische Systeme

Nach Bild 6.10 bestehen die Systeme aus einer fest auf einem Dauermagneten befestigten Spule. Zwischen den Polen des Magneten schwingt ein mechanisch bewegtes

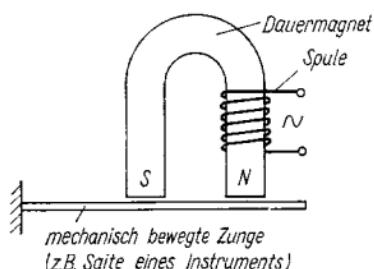


Bild 6.10  
Prinzip eines elektromagnetischen Tonerzeugersystems.  
Durch Bewegen der Zunge ändert sich der magnetische Fluß. In die festsitzende Spule wird Tonfrequenzspannung induziert  $f_{\text{mech.}} = f_{\text{elektr.}}$

*ferromagnetisches* Teil (bei Musikinstrumenten z. B. eine Saite oder eine Stahlzunge) und verändert den magnetischen Fluß im Eisenkern des Magneten, auf dem die Spule aufgebracht ist. Nach dem Induktionsgesetz entsteht an den Anschlüssen der Spule eine Wechselspannung. Ihre Frequenz entspricht der der mechanischen Schwingungen, z. B. der Saite einer Elektrogitarre.

Je geringer der Abstand zwischen dem Magneten und dem mechanisch schwingenden Teil gewählt wird, um so obertonreichere Wechselspannungen entstehen. Bei einem Tonabnehmersystem für ein elektromechanisches Musikinstrument sind obertonreiche Wechselspannungen erwünscht. Dagegen muß das System eines Tonarms für Plattenspieler möglichst obertonarme Schwingungen abgeben, denn hier bedeuten Obertöne, daß die mechanischen Auslenkungen der Abtastnadel entsprechend der Rillenführung der Schallplatte nicht in proportionale Spannungsverläufe umgewandelt werden. Man sagt, es entstehen *nichtlineare* Verzerrungen, der *Klirrfaktor* liegt zu hoch.

Nichtlineare Verzerrungen rufen im geringen Maß alle elektronischen Bauelemente mit einer gekrümmten Arbeitskennlinie hervor. Das sind z. B. Drosseln mit Eisenkern, Übertrager (Transformatoren), Röhren, Transistoren und Gleichrichter. Durch bestimmte Maßnahmen werden die Krümmungen der Kennlinie bzw. ihre unerwünschten Auswirkungen verringert. Besondere Bedeutung kommt dabei der richtigen Wahl des Arbeitspunktes (z. B. einer Röhre in einem NF-Verstärker) zu.

Neben nichtlinearen gibt es noch *lineare* Verzerrungen. Sie liegen vor, wenn *bestimmte Frequenzbereiche schwächer oder stärker* übertragen werden. Bei Tonbandaufnahmen treten Verluste besonders bei sehr hohen Frequenzen ein. Die Wiedergabe ist gegenüber dem ursprünglichen Klangbild verändert (*linear verzerrt*). Die Ursachen linearer Verzerrungen sind unterschiedlich, bei NF-Verstärkern treten hauptsächlich *kapazitive Nebenschlüsse* durch Abschirmungen und Übertragungskapazitäten (Wicklungskapazitäten) auf. An hochohmige Ein- und Ausgänge von Vorverstärkern

sollten daher nur kurze und kapazitätsarme abgeschirmte Leitungen angeschlossen werden, um zu große „Höhenverluste“ zu vermeiden.

### 6.2.2. Elektrodynamische Systeme

Während bei einem elektromagnetischen System die Induktionsspule fest auf dem Dauermagneten sitzt, ist bei einem elektrodynamischen System die Induktionsspule *beweglich* direkt im Magnetfeld zwischen den Polen des Dauermagneten aufgehängt. Die Spule muß mit dem zum Tonerzeugungssystem gehörenden mechanischen Schwinger (Saite oder Stahlzunge) *gekoppelt* sein (Bild 6.11). Eine Induktionsspannung entsteht, wenn ein elektrischer Leiter (gesteckter Draht oder Spule) ein magnetisches Kraftlinienfeld schneidet und sich hierbei die Anzahl der geschnittenen Kraftlinien ändert. Das kann durch die Bewegung des Kraftlinienfeldes, durch Veränderung des magnetischen Flusses oder durch Bewegen der Induktionsspule im feststehenden Magnetfeld erreicht werden. Ein Fahrraddynamo gibt z. B. Spannung ab, wenn man das Antriebsrad und somit den Anker (Spule) dreht und das Gehäuse (Ständer mit Dauermagneten) festhält. Auch umgekehrt wird Spannung erzeugt, indem man das Rad (Spule) festhält und das Gehäuse (Magnetfeld) rotieren

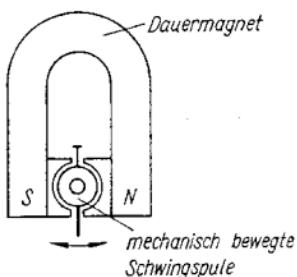


Bild 6.11 Prinzip eines elektrodynamischen Tonerzeugersystems.

Im Luftspalt des Dauermagneten wird eine Schwingsspule durch mechanische Schwingungen in Bewegung versetzt. Hierbei ändert sich die Zahl der von der Spule geschnittenen Kraftlinien im Takt der mechanischen Schwingungen, so daß von den Spulenanschlüssen eine Tonfrequenzspannung abgenommen werden kann ( $f_{\text{mech.}} = f_{\text{elektr.}}$ ).

läßt. In beiden Fällen war die Induktionsspule beweglich zwischen den Polen des Dauermagneten gelagert (elektrodynamisches Prinzip).

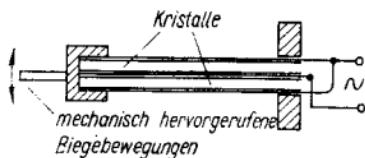
Elektrodynamische Tonabnehmersysteme zeichnen sich durch geringe Verzerrungen aus (Verwendung für Plattenspieler, siehe auch elektromechanische und elektrodynamische Lautsprecher). Ihre Ausgangsspannung ist kleiner als die elektromagnetischer Systeme. Von den elektromechanischen Musikinstrumenten werden vor allem *elektrische Zithern* mit elektrodynamischen Tonerzeugersystemen ausgerüstet.

### 6.2.3. Piezoelektrische Systeme

Weit verbreitet sind Kristalltonabnehmer und Kristallmikrofone. Bei ihnen wird der *piezoelektrische Effekt* von Piezokristallen (Signettesalz oder Bariumtitanat) ausgenutzt. An den Grenzflächen dieser Kristalle treten elektrische Ladungen auf, wenn sie geringfügig verbogen oder verdreht werden (Bild 6.12). Beim Übertragen mechanischer Schwingungen auf ein Piezokristall entstehen Wechselspannungen, die, auf elektromechanische Musikinstrumente bezogen, Tonfrequenzspannungen darstellen. Als Tonabnehmer erzeugen Piezokristallsysteme nur geringe nicht-lineare Verzerrungen und geben hohe Ausgangsspannungen ab. Gegen mechanische und klimatische Einflüsse sind sie empfindlich (vor Stoß, zu starker Erregung oder Erhitzung und vor Feuchtigkeit schützen). Piezoelektrische Systeme eignen sich für die *direkte Abtastung* von Resonanzböden (s. Bild 6.2). In diesem Fall muß aber die Richtigkeit der Bezeichnung „elektromechanische Musikinstrumente“ in Frage gestellt werden, denn mit Mikrofonen bzw. Körperschallmikrofonen läßt sich *jeder Resonator eines mechanischen Musikinstruments* abtasten (siehe Abschnitt 3.1.).

Bild 6.12

Prinzip des piezoelektrischen Tonerzeugersystems. Bei Biegebewegung der Kristalle treten an ihren Grenzflächen Wechselspannungen auf ( $f_{\text{mech.}} = f_{\text{elektr.}}$ )



#### 6.2.4. Elektrostatische und fotoelektrische Abtastsysteme

Diese Systeme eignen sich vor allem für die Abtastung von *Rotoren*. Sie spielen bei elektroakustischen Instrumenten nur eine untergeordnete Rolle, denn die meisten Instrumente haben elektromagnetische oder elektrodynamische Systeme.

### 6.3. Grundschaltungen elektronischer Tongeneratoren

Die ersten größeren elektronischen Musikinstrumente wurden mit *Glimmlampen*- und *Thyratrongeneratoren* aufgebaut. Später dominierten verschiedeneartige, mit Verstärkerröhren bestückte *RC*- und *LC-Generatoren*, *Multivibratoren* und *Sperrschwinger*. Diese Schaltungen werden noch heute beim Bau moderner elektronischer Instrumente eingesetzt, zur Schwingungserzeugung dienen jedoch nur noch Transistoren als verstärkende (aktive) Bauelemente.

Mit *Gasentladungsröhren* (Glimmlampen, Thyratrons) können *ungedämpfte* (nicht abklingende) sägezahnförmige *Kippschwingungen* erzeugt werden. Die Tonfrequenzspannung entsteht an einem Kondensator, der parallel zur Gasentladungsröhre geschaltet ist. Ungezündet hat die Röhre einen großen Widerstand. Nach Anlegen der Betriebsspannung an die Schaltungen nach Bild 6.13a und Bild 6.13b wird zunächst der Kondensator C über den Widerstand R bis zur *Zündspannungshöhe* der Gasentladungsröhre mit Gleichspannung aufgeladen. Die Röhre zündet und stellt in diesem Zustand einen kleinen Widerstand dar, über den sich der Kondensator bis zum Erreichen der *Löschspannung* der Glimmlampe entlädt. Nun beginnt der Vorgang erneut und wiederholt sich fortwährend. Am Kondensator lässt sich z. B. mit einem Oszillografen der in Bild 6.13c gezeichnete Kippspannungsverlauf nachweisen.

Die mit Elektronenröhren oder Transistoren aufgebauten Oszillatorschaltungen (Bild 6.14) arbeiten mit einer Rückkopplung (*Mitkopplung*). Man versteht darunter das Zurückführen eines Teils der Ausgangsenergie der Schwing-

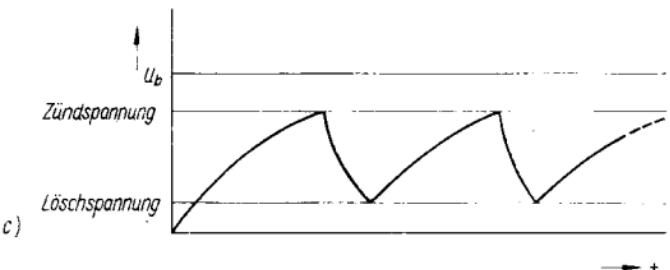
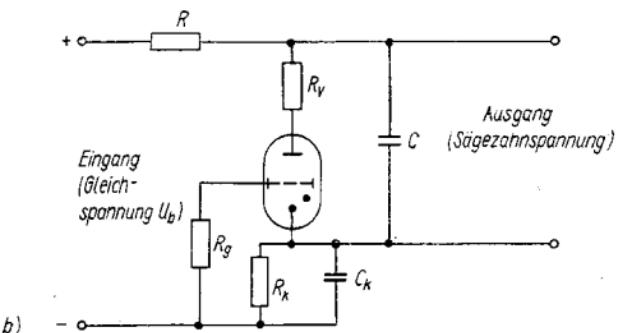
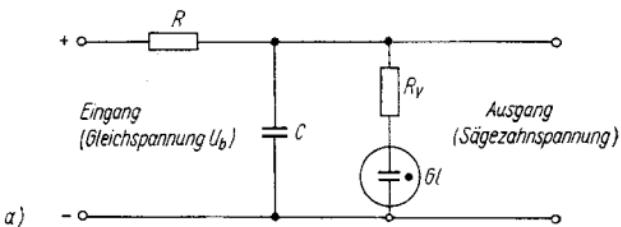


Bild 6.13 Generatoren zur Erzeugung von Sägezahnspannungen; a - Glimmlampengenerator, b - Thyatrongenerator, c - Kippsspannungsverlauf am Kondensator C

schaltung auf ihren Eingang. Die zurückgeföhrten Wechselspannungen müssen eine ausreichende Amplitude aufweisen, damit die Schwingungen nicht abklingen, und sie müssen in der richtigen Phasenlage am Eingang der Schaltung anliegen.

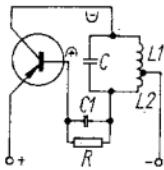
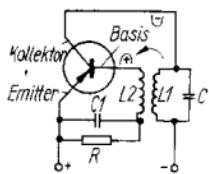
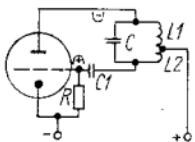
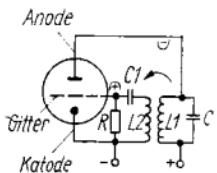
Eine positive Amplitude (Halbwelle) am Eingang (Steuergitter) der Röhre bzw. an der Steuerelektrode des Tran-

sistors (Basis) ruft eine negative Amplitude am Ausgang (Anode) der Röhre bzw. an der Ausgangselektrode (Kollektor) des Transistors hervor. Die Ein- und Ausgangsspannungen sind bei den gewählten Schaltungen um  $180^\circ$  gegeneinander verschoben.

Bei der Mitkopplung muß aber ein Teil der Ausgangsspannung so auf den Eingang zurückgeführt werden, daß auf eine positive Amplitude der Eingangsspannung eine ebenfalls positive Amplitude der Rückkopplungsspannung trifft (gleiche Phasenlage). Würde am Eingang eine negative Amplitude anliegen, so müßte die Amplitude der zurückgekoppelten Spannung am Eingang ebenfalls negativ gerichtet sein (wieder phasengleich mit der Eingangsspannung). Die Rückkopplungsspannung muß also im Rückkopplungszweig der Generatorschaltung eine Phasenverschiebung von  $180^\circ$  erfahren, um die Phasengleichheit zwischen der Eingangsspannung und Rückkopplungsspannung am Eingang zu erwirken. Andernfalls würde keine Mitkopplung, sondern eine *Gegenkopplung* eintreten, und der Generator könnte nicht schwingen. Von Gegenkopplungen wird in anderen Schaltungen Gebrauch gemacht, um z. B. nichtlineare Verzerrungen zu verringern oder den *Frequenzgang* eines Verstärkers zu beeinflussen. In die Generatorschaltungen (Bild 6.14a und Bild 6.14b) wurden Halbwellen eingezeichnet, um die Phasenlage der Spannungen zu zeigen.

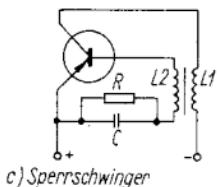
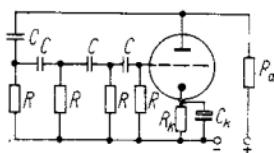
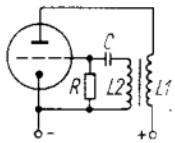
Zum tiefgründigen Verstehen der Funktionsweise der Generatorschaltungen gehört Grundlagenwissen, das hier nicht vermittelt werden kann (z. B. Funktionsweise von Elektronenröhren und Transistoren, Kennlinien, Bestimmung von Arbeitspunkten, Verhalten von Spulen und Kondensatoren im Gleich- und Wechselstromkreis usw.). Die ausgewählten Schaltungen zur Schwingungserzeugung können nur informatorisch beschrieben werden.

Die im Literaturverzeichnis angegebenen Bücher [2], [3], [12], [13], [14], [16], [19] und [23] enthalten diese Grundlagen. Über Generatorschaltungen findet der Leser in [12], [13], [23] weitere Angaben.

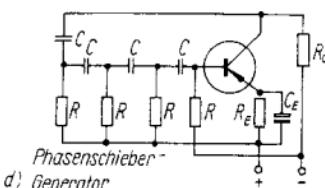


a) Meißnergenerator

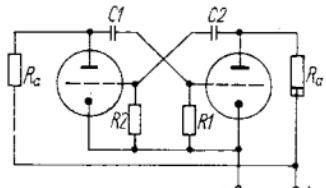
b) Induktiver Dreipunktoszillator  
(Hartley - Schaltung)



c) Sperrschwinger



d) Phasenschieber - Generator



e) Multivibrator (astabil  $\Leftrightarrow$  selbstschwingend)

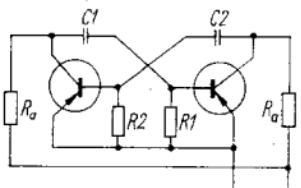


Bild 6.14 Grundschaltungen elektronischer Tongeneratoren (jeweils röhren- und transistorbestückte Schaltungsbeispiele); a - Meißner-Generator, b - induktiver Dreipunktoszillator (Hartley-Generator), c - Sperrschwinger, d - RC-Phasenschiebergenerator, e - astabiler Multivibrator

### *Meißner-Generator nach Bild 6.14a*

L1 und C bilden den frequenzbestimmenden Schwingkreis. L2 ist die Rückkopplungsspule. C1 und R dienen der Einstellung des Arbeitspunktes der Röhre bzw. des Transistors. Die richtige Phasenlage der rückgekoppelten Spannung wird durch die Polung der Rückkopplungsspule erreicht. Bei falscher Polung tritt eine Gegenkopplung ein. In diesem Fall schwingt die Schaltung nicht. Die Ausgangsspannung ist allgemein sinusförmig, jedoch ändert sich ihre Kurvenform mit dem Grad der Kopplung zwischen L1 und L2.

### *Induktiver Dreipunktoszillatator (Hartley-Generator) nach Bild 6.14b*

C, L1 und L2 bilden den Schwingkreis. C1 und R1 legen den Arbeitspunkt der Röhre bzw. des Transistors fest. Die Schwingkreisspule (L1 + L2) ist mit 3 Anschlüssen versehen (daher die Bezeichnung Dreipunktoszillatator). Die Wicklung L2 ist die Rückkopplungsspule. An den Enden der Spule ergeben sich bei jeder Halbwelle der erzeugten Wechselspannung, bezogen auf die wechselspannungsmäßig an Masse liegende Spulenanzapfung, *entgegengesetzte* Polaritäten, so daß die für eine Mitkopplung erforderlichen Phasenlagen vorhanden sind.

### *Sperrschwinger nach Bild 6.14c*

Es handelt sich beim Sperrschwinger im Prinzip um einen Meißner-Generator mit sehr fester Rückkopplung. Er erzeugt sägezahnförmige Wechselspannungen. Die Wirkungsweise des Sperrschwingers beruht auf der Aufladung des Kondensators C, die zur Sperrung des Röhren- bzw. Transistorstroms führt. Dann entlädt sich der Kondensator C über R (Zeitkonstante  $R \cdot C$ ), bis die Röhre bzw. der Transistor wieder Strom zieht und der Aufladevorgang von C erneut beginnt.

Der entstehende Kippspannungsverlauf entspricht der Auf- und Entladekurve des Kondensators C.

#### *RC-Phasenschieber-Generator nach Bild 6.14d*

Der Generator ist mit einer RC-Phasenschieberkette (in Bild 6.14d alle Widerstände R und Kondensatoren C) aufgebaut. Die Kette bewirkt eine Phasenverschiebung von etwa  $180^\circ$  und liegt zwischen dem Eingang und dem Ausgang der Schaltung. Damit ist die für Mitkopplung erforderliche Phasenlage gewährleistet. Die Schwingfrequenz wird vorwiegend von den Kondensatoren C und von den Widerständen R bestimmt. Die RC-Glieder der Kette wirken als Spannungsteiler für die Rückkopplungsspannung. Das verwendete Verstärkerelement muß daher eine Mindestverstärkung aufweisen. Soll die Frequenz geringfügig regelbar sein, so genügt es, einen Widerstand R zu variieren (Regler). Wird ein größerer Frequenzabstimmungsbereich gefordert, so müssen mehrere Widerstände gleichzeitig und gleichmäßig in ihrem Wert geändert werden (Einbau von Tandem-Potentiometern). Der Generator gibt sinusförmige Wechselspannungen ab. Er wird deshalb in elektronischen Musikinstrumenten häufig als *Vibratogenerator* verwendet. Der Widerstand  $R_k$  dient wieder zur Arbeitspunkt-einstellung der Röhre. In der transistorisierten Schaltung sorgt besonders der Widerstand R an der Basis für den richtigen Arbeitspunkt des Transistors. Der Widerstand  $R_E$  hat die Aufgabe, den Arbeitspunkt des Transistors zu stabilisieren (Temperaturverhalten von Transistoren).  $C_E$  überbrückt  $R_E$ , wechselspannungsmäßig wird dadurch  $R_E$  zur Verhinderung einer unerwünschten Gegenkopplung kurzgeschlossen (wird  $C_E$  weggelassen, so tritt eine *Stromgegenkopplung* ein, die zum Versagen der Schaltung führen kann). In der Röhrenschaltung soll der Kondensator  $C_k$  das Auftreten einer Stromgegenkopplung verhindern.  $R_a$  sind die *Arbeitswiderstände*, an denen die Ausgangsspannungen der Generatoren auftreten (der Fachmann spricht vom „Abfallen“ der Ausgangsspannungen an den Widerständen  $R_a$ ).

### Astabilier Multivibrator nach Bild 6.14e

Der selbstschwingende Multivibrator ist ein 2stufiger (mit 2 hintereinander geschalteten Röhren oder Transistoren bestückter) NF-Verstärker, dessen Ausgangsspannung auf seinen Eingang zurückgeführt wird.

Beim Multivibrator kommt es abwechselnd zum Öffnen des Strompfades der einen Röhre bzw. des einen Transistors, während der Strom der anderen Röhre bzw. des anderen Transistors gesperrt ist. Frequenzbestimmend sind vor allem die Werte von  $C_1, R_1$  und  $C_2, R_2$ . Die Ausgangsspannung des Multivibrators ist *fast rechteckförmig* und enthält nur *ungeradzahlige Harmonische*. Die Entstehung von Rechteckimpulsen kann aus der Addition von Sinusschwingungen verschiedener bestimmter Frequenzen und Amplituden abgeleitet werden. Der Klang rechteckförmiger Tonfrequenzen ist eigentlich „hohl“, weil die geradzahligen Harmonischen fehlen (gedackte Orgelregister, „gestopfte“ Trompeten).

Nach Bild 6.15 ergibt sich auch eine Rechteckschwingung, wenn 2 Sägezahnspannungen überlagert werden.

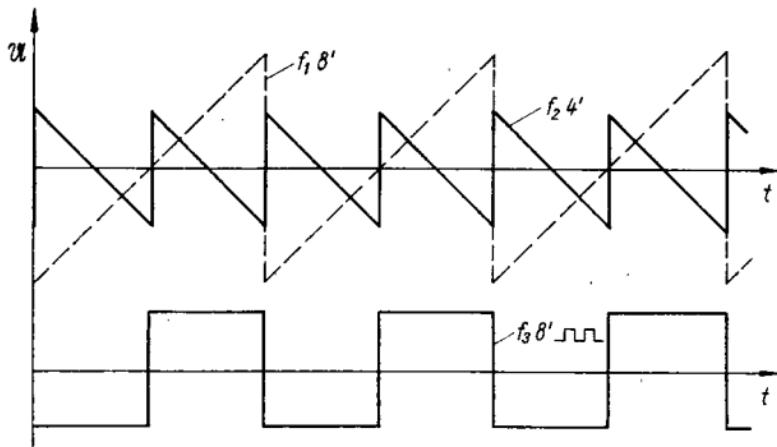


Bild 6.15 Entstehung einer 8'-Rechteckspannung durch Überlagern einer 8'- mit einer 4'-Sägezahnspannung (idealisierte Darstellung)

#### 6.4. Klaviaturen und Tonfrequenzschalter

Für elektroakustische Musikinstrumente sind auf Stahlrahmen befestigte Klaviaturen am besten geeignet. Holzrahmentastaturen müssen zusätzlich gegen geringfügiges Verziehen mit profilierten Stahlschienen versteift werden, um die Funktion der Tastenschaltkontakte zu garantieren. Beim Selbstbau eines Instruments werden zweckmäßig industriell hergestellte Klaviaturen bzw. Sonderfertigungen verwendet, die man in Klaviaturenfabriken bestellen kann. Es stehen verschiedene Modelle zur Auswahl. Mit etwas Geschick lassen sich auch aus alten Klavieren ausgebauten Klaviaturen umarbeiten.

Die Klaviaturen bilden in Verbindung mit den Tastenkontakten nach Bild 6.16 eine Baugruppe, die hohen Anforderungen genügen muß. Mechanische Stabilität steht neben Leichtgängigkeit der Tasten und Schalter sowie ihrer Funktionssicherheit und Beständigkeit im Vordergrund. Die langen oberen Kanten der Tasten sollten nicht nur gebrochen, sondern sichtbar etwas abgerundet sein, denn beim Spielen muß man bequem mit den Flächen der Fingernägel über die Tasten streichen können, um so Läufe mit wenig Fingerfertigkeit im schnellen Tempo erklingen zu lassen. Scharfe Tastenkanten sind dieser „Spielweise“, die häufig praktiziert wird, nicht zuträglich.

Bei Tonfrequenzkontakten machen sich mechanische und elektrische Schaltgeräusche unangenehm bemerkbar. Sie müssen verhindert werden. Sehr unangenehm ist der Tastenklick. Im Moment der Kontaktgabe entsteht beim Niederdrücken der Tasten ein im Lautsprecher deutlich hörbares Knacken. Weiterhin kann eine prasselnde und unsaubere Tonwiedergabe durch mangelhafte Kontaktbeschaffenheit (Übergangswiderstände) eintreten. Bisweilen kommt es auch zu harten Toneinsätzen, indem die Töne beim Schließen der Kontakte sofort mit voller Lautstärke einsetzen. Hier fehlen die Einschwingvorgänge, wie sie bei mechanischen Musikinstrumenten vorhanden sind. Sie müssen wenigstens durch einen zunächst leisen und dann lauter werdenden Toneinsatz ersetzt werden.

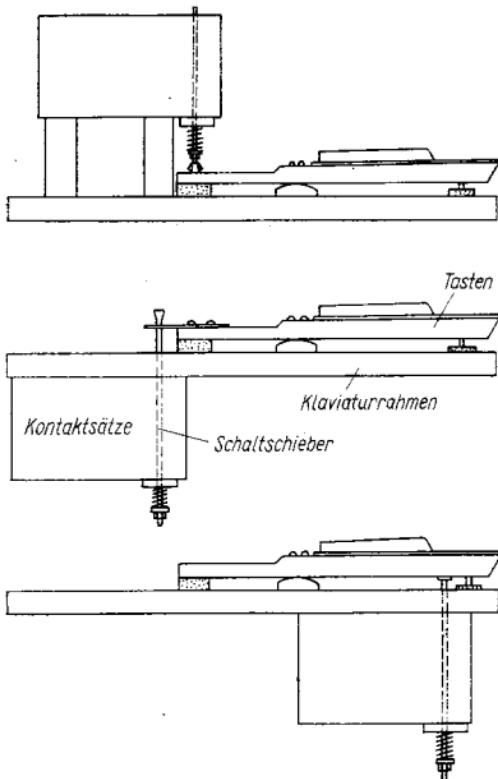


Bild 6.16 Die Klaviaturen bilden mit den Kontaktsets eine Einheit

Um Tastenklicken und sonstige Störgeräusche zu vermeiden, wurden schon die verschiedenartigsten Kontaktkonstruktionen angewendet. Sie haben sich unterschiedlich gut bewährt.

Großen Einfluß hat das Kontaktmaterial auf die Funktionsstüchtigkeit der Schalter. Es gibt Kontaktausführungen, die einen zunächst leisen und dann bis zur vollen Lautstärke ansteigenden Toneinsatz bewirken. Die Töne setzen etwa bei einem Drittel des Tiefgangs der Tasten, der insgesamt 10 bis 11 mm betragen kann, ein. Beim weiteren Durchdrücken der Tasten nimmt die Lautstärke kontinuierlich zu. Die maximale Lautstärke wird bereits schon etwa 2 mm vor dem Tastenanschlag erreicht. Es ergeben sich weiche Toneinsätze, die Einschwingvorgänge vortäuschen. Bei der-

artigen Kontaktkonstruktionen besteht die Gefahr, daß es zwischen den einzelnen Tönen zu Lautstärkeunterschieden kommt, die den Klangeindruck des Instruments verschletern. Häufig wurden in diesen Fällen Einstelleinrichtungen vorgesehen.

Bei der Auswahl bzw. Konstruktion der Kontakte (Bild 6.17a bis Bild 6.17e) müssen viele Faktoren berücksichtigt werden: Kräfteaufwand zum Betätigen der Kontakte, Verschleißfestigkeit, Geräuschkfreiheit beim Schalten, zeitliche Konstanz aller elektrischen und mechanischen Eigenchaften, Preisfragen und Arbeitsaufwand für den Auf- und Einbau der Kontakte. Viele Firmen verwenden *Drahtkontakte*. Es wurden auch schon *Glimmlampenkontakte* oder Flachbahnregler nach dem Prinzip der Lautstärkeregelung mit Potentiometern eingebaut. Als brauchbar erwiesen sich ferner *kapazitive Kontakte*, jedoch nur für hochohmige Schaltkreise.

Bei Glimmlampen verändern sich im Laufe der Zeit häufig die elektrischen Parameter. Sie haben sich deshalb als „Kontaktbauelemente“ nicht besonders gut bewährt. Harte Toneinsätze wie bei metallischen Kontakten lassen sich

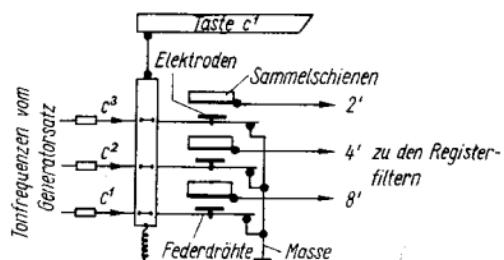


Bild 6.17a Kapazitive „Kontakte“ (schematische Darstellung). Der metallische Belag auf den Sammelschienen ist mit einer Isolierschicht versehen. Der Belag bildet jeweils eine Elektrode (Platte) des „Kondensatorschalters“. Die Tonfrequenzen liegen auf den beweglichen Elektroden, die bei nichtbetätigten Klaviaturtasten an Masse liegen (sie sind kurzgeschlossen). Die Kapazitäten der „Kontakte“ vergrößern sich mit zunehmendem Tiefgang der Tasten, die Toneinsätze erfolgen weich. Da nur kleine Kapazitätswerte erreicht werden können, müssen die Schaltkreise hochohmig ausgeführt sein

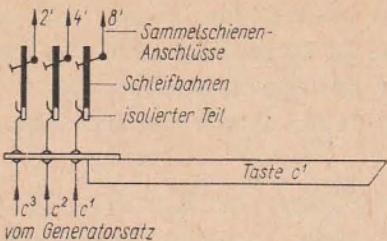


Bild 6.17b Kohleschichtschleifbahnen im Tastenkontaktsatz (schematische Darstellung).

Im Ruhezustand liegen die tonfrequenzführenden Schleifer auf den unteren isolierten Flächen der Träger der Schleifbahnen. Beim Niederdrücken von Tasten gelangen die Tonfrequenzen auf die leitenden Schichten der Reglerschleifbahnen. Der jeweils zwischen den Schleifern und dem Sammelschienenabgriff auftretende Widerstand der Kohleschichtschleifbahnen verringert sich mit größer werdendem Tastenhub. Die Abgriffe der Schleifbahnen zu den Sammelschienen sind als Trimmregler ausgebildet, so daß die Lautstärke der einzelnen Töne aneinander angepaßt werden kann.

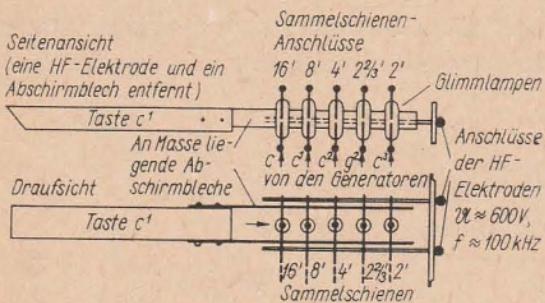


Bild 6.17c Glimmlampen als Tastenkontakte (schematische Darstellung).

Beiderseits der Glimmlampen sind HF-Elektroden angebracht, an denen etwa 650 V HF-Spannung (100 kHz) liegen. Bleche bewirken zwischen den Glimmlampen und den HF-Elektroden eine Abschirmung des HF-Feldes. Bei Tastenbetätigung entfernen sich die Abschirmbleche, das HF-Feld wirkt auf die Glimmlampen ein, so daß sie zünden (Gasionisation). Im gezündeten Zustand sind die Glimmlampen niederohmig und für die anliegenden Tonfrequenzspannungen leitend. Da die Zündung der Lampen allmählich eintritt und auch die Löschung nicht schlagartig erfolgt, ergibt sich eine weiche Tonwiedergabe, die außerdem vom jeweils erreichten Tiefgang der Tasten abhängig ist. Die Innenwiderstände der Glimmlampen dienen gleichzeitig als Entkoppelungswiderstände.

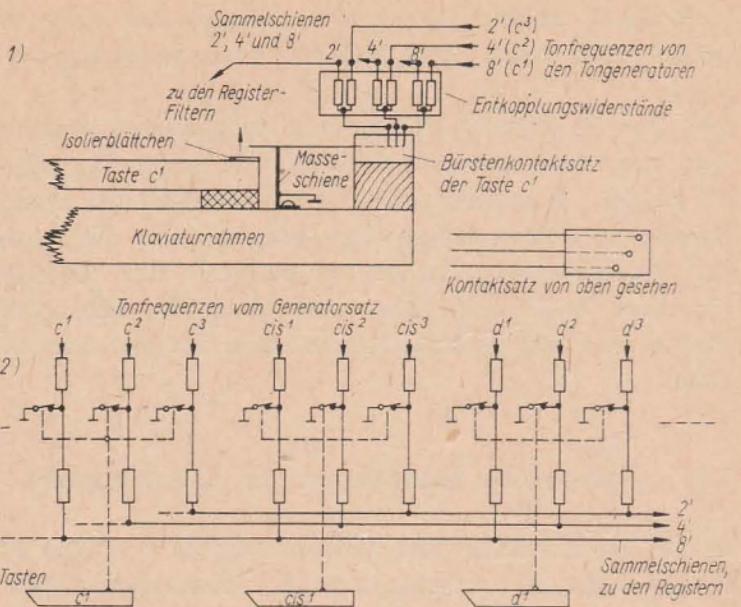


Bild 6.17d Bürstenkontakte 3fach (schematische Darstellung); 1 - mechanischer Aufbau, 2 - Schaltungsprinzip (bei nichtbetätigten Tasten sind die Tonfrequenzen zwischen den Entkopplungswiderständen kurzgeschlossen, „an Masse gelegt“. In der Praxis werden Bürstenkontakte mit mehr als 3 Kontakten ausgeführt

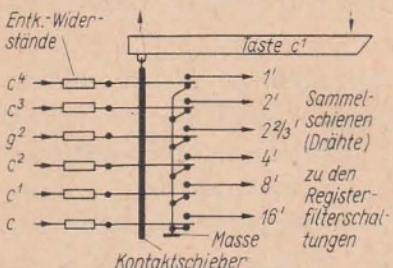


Bild 6.17e Drahtkontakte.

Sie wurden schon im herkömmlichen Orgelbau, z. B. zum Schalten der freien Kombinationen, verwendet und haben sich gut bewährt. Das Schaltungsprinzip der Kontaktsets geht aus dem Bild eindeutig hervor. In der Tastenruhestellung sind alle über die Entkopplungswiderstände eingespeisten Tonfrequenzen kurzgeschlossen. Die Sammelschienen werden manchmal mit Widerstandsmaterial belegt. Mit zunehmendem Kontaktdruck verringert sich der Widerstand des Materials (leitender Gummi oder leitende Kunststoffe), so daß ein zunächst leiser Toneinsatz bis zum Anschlag der Tasten immer lauter wird. In dieser Weise entstehen weiche Toneinsätze

auch durch Regelschaltungen beseitigen. Der Aufwand ist jedoch groß, wenn diese Methode konsequent angewendet wird.

Mit der Weiterentwicklung von integrierten Bausteinen sind auf dem Gebiet „Tonfrequenzschalter für elektroakustische Musikinstrumente“ Neuerungen zu erwarten. Dioden und Transistoren übernehmen dann die Funktion der Tastenkontakte (Regelschaltungen). Der Platzbedarf für diese Regelschaltungen wird so gering sein, daß ihr Einbau in größeren Stückzahlen keine Schwierigkeiten bereitet.

## 6.5. Prinzipielle Schaltungen zur Klangformung

In den einführenden Abschnitten, besonders in den Punkten 2.2. und 2.3., wurden bereits verschiedene Arten der Klangfarbenerzeugung erläutert.

Bei der *additiven Klangsynthese* werden wie bei der Pfeifenorgel die Grund- und Obertöne getrennt erzeugt und zum Gesamtklangspektrum zusammengesetzt. Durch Lautstärkeregler für jede Fußlage lassen sich bei elektroakustischen Instrumenten besonders zahlreiche Klangvariationen einstellen.

Das selektive Verfahren geht hingegen von obertonreichen Schwingungen aus. Die Klangfarben entstehen durch Verändern des Obertongehalts der Tonfrequenzen, indem man sie über Filter leitet. Bei großen Instrumenten werden beide Arten der Klangbildungsverfahren angewendet. Die verschiedenen Effektschaltungen wirken ferner klangverändernd.

### 6.5.1. Prinzipschaltungen für die additive Klangbildung

Wie Bild 6.18a und Bild 6.18b zeigen, werden von den Sammelschienen des Tastenkontaktsatzes (je Fußlage eine Schiene) sinusförmige Tonfrequenzspannungen abgenommen und gelangen zu Schaltern oder Potentiometern. Die sinusförmigen Tonfrequenzen der einzelnen Fußlagen

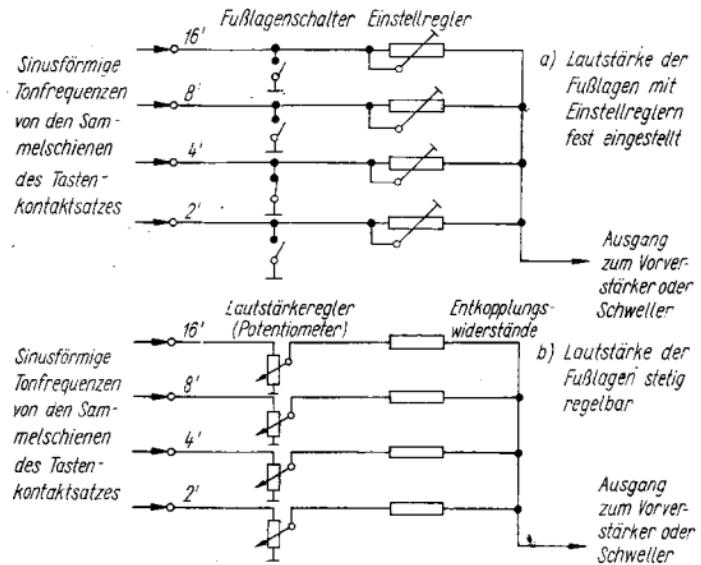


Bild 6.18 Prinzipschaltungen für die additive Klangbildung

können somit gemischt werden. Die Schaltung nach Bild 6.18b bietet mehr Möglichkeiten der Einstellung verschiedener Klangfarben als die Schaltung nach Bild 6.18a. Da rein sinusförmige Tonfrequenzen gemischt werden, handelt es sich um reine additive Klangformung.

Erzeugen die Tongeneratoren obertonreiche Schwingungen, so fügt man nach Bild 6.19 Filter ein, die die obertonreichen Schwingungen in sinusförmige *umwandeln*, bevor sie zu den Schaltungen für die additive Klangformung nach Bild 6.18 gelangen. Auch in diesem Fall kommt eine reine additive Klangbildung zustande.

Da aber obertonreiche Schwingungen in der Schaltung nach Bild 6.19 zur Verfügung stehen, wird auf die selektive Klangformung nicht verzichtet. Das ist in Bild 6.19 angedeutet. Die Tonfrequenzspannungen werden, noch bevor sie die Sinusfilter passiert haben, abgegriffen und den Filtern für die selektive Klangbildung zugeführt.

Jeder Fußlage werden mehrere Filter (Register), die in Bild 6.19 nicht mitgezeichnet wurden, zugeordnet. Schaltet

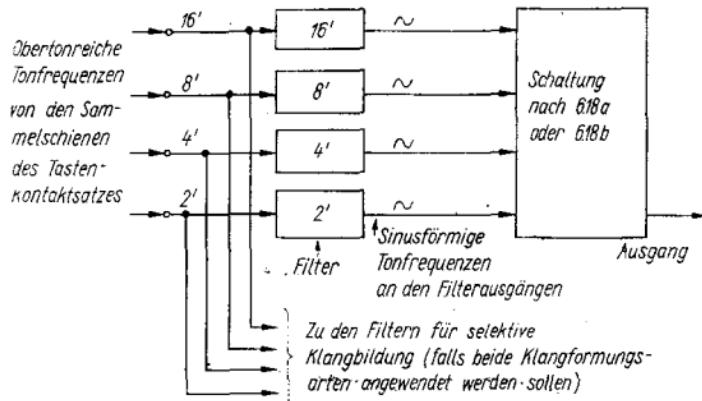


Bild 6.19 Additive Klangbildung beim Vorhandensein obertonreicher Frequenzen

man z. B. nur 8'- oder nur 4'-Register ein, so liegt jeweils eine reine selektive Klangbildung vor. Werden aber gleichzeitig Register mit unterschiedlichen Fußlagen (z. B. 16' + 2' oder 8' + 2') eingeschaltet, so kommt es noch zusätzlich zu einer additiven Klangbildung. Die zur Mischung verwendeten Töne sind zwar selbständige getrennt erzeugte Frequenzen, aber sie sind nicht sinusförmig (die additive Klangbildung liegt also nicht in ihrer reinen Form vor wie in der Schaltung nach Bild 6.18a und Bild 6.18b).

Die Einstellregler (Bild 6.18a) dürfen nicht auf zu kleine Werte getrimmt werden, denn sie müssen das Kurzschließen des gemeinsamen Ausgangs aller Fußlagenzweige verhindern, wenn einige Fußlagenschalter geschlossen bleiben. Mit den Einstellreglern wird die Lautstärke jeder Fußlage einzeln eingestellt. Somit erfüllen die Einstellregler gleichzeitig 2 Funktionen: Sie *entkoppeln* die Fußlagenzweige gegeneinander und dienen zu ihrer *Lautstärkeeinstellung*.

In der Schaltung nach Bild 6.18b kann die Lautstärke jeder Fußlage einzeln, fast unabhängig voneinander und nach Belieben vom Spieler mit den Potentiometern geregelt

werden. Die Entkopplungswiderstände sind Festwiderstände.

Die Regler (Potentiometer) sind an den Spieltischen oft als Flachbahnregler ausgeführt und sind mit Fußlagenzahlen gekennzeichnet (Sinuszugriegel, Schichtschiebewiderstand).

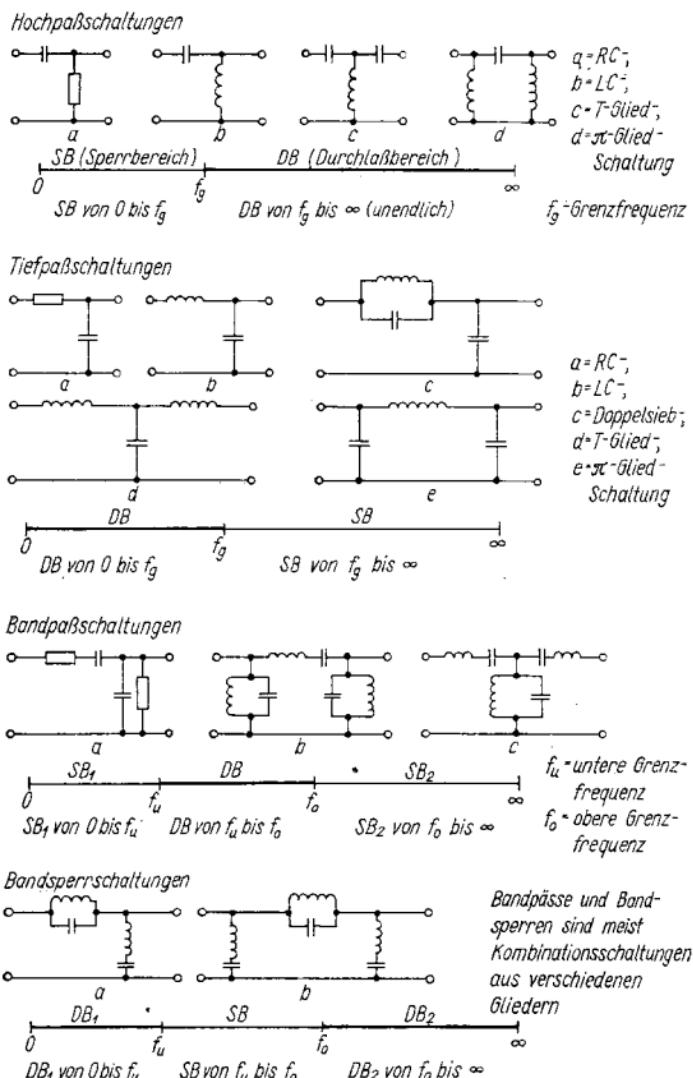


Bild 6.20 Filterschaltungen (Eingänge links, Ausgänge rechts)

### 6.5.2. Prinzipschaltungen für die selektive Klangbildung

Beim selektiven Klangformungsverfahren wird der Oberwellengehalt obertonreicher Tonfrequenzen durch frequenzabhängige Schaltungen (Filter, Registerschaltungen) beeinflusst (siehe Abschnitt 2.3.).

Die Filterschaltungen haben *RC*-, *RL*- oder *LC*-Glieder in Form von *Resonanzkreisen*, *Tief*-, *Hoch*- und *Bandpässen* oder *Bandsperrern*. Bild 6.20 zeigt verschiedene Schaltungsvarianten. Die Lage der Sperr- und Durchlaßbereiche ist von dem Schaltungsaufbau der Filter und von der Bemessung der Bauelemente abhängig.

Bei Filtern mit *LC*-Gliedern können sich je nach Lage der Schwingkreisresonanzfrequenzen und der Dämpfungsverhältnisse Frequenzbereiche mit besonders guter Durchlaßfähigkeit (Resonanzspitzen) herausbilden. Man spricht dann von *Formantgebieten* und *Formantfiltern*, die bestimmte Oberwellenbereiche anheben (Spannungsüberhöhung im Resonanzbereich schmalbandiger Schwingkreise).

Um die Durchlaßbereiche nicht zu stark einzuengen (die Filter würden sonst nur in kleinen Teilbereichen der Tastatur wirken), werden häufig Widerstände zur *Dämpfung* von Resonanzspitzen nach Bild 6.21a und Bild 6.21d in die Registerfilter eingefügt. Die Filter werden dadurch breitbandiger und wirken, über die Klaviatur verteilt, gleichmäßiger.

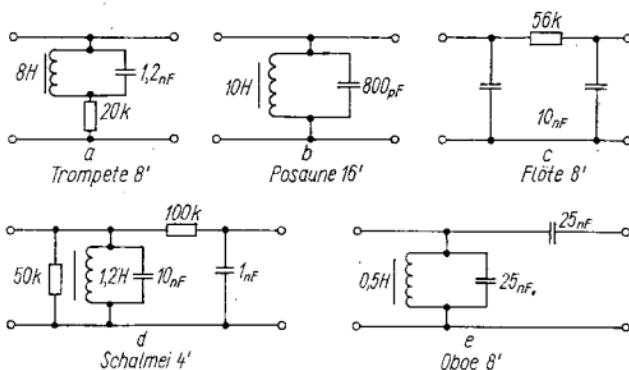


Bild 6.21 Beispiele typischer Registerfilter

### 6.5.3. Erzeugung klanglicher Effekte

Elektronische Tongeneratoren erzeugen wie Orgelpfeifen gleichmäßig anhaltende Schwingungen (von den Ein- und Ausschwingvorgängen abgesehen). Um das Klangbild beim Spiel zu beleben, wendet man Schaltungen an, mit denen entweder die Frequenz oder die Amplitude der Tonfrequenzspannungen moduliert wird (siehe Text zu Bild 6.8 und Bild 6.9). Mit den Tonfrequenzen des Generatorsatzes (Dauertöne mit gleichbleibender Amplitude) lassen sich außerdem Schlageffekte (Perkussion) und Nachklang- bzw. Abklingeffekte nach Bild 6.22 erzeugen.

Schlageffekte entstehen z. B., indem vor oder hinter einer Vorverstärkerstufe ein Fotowiderstand in den Tonfrequenzkanal geschaltet wird. Eine kleine Lampe (Taschenlampe) beleuchtet den Fotowiderstand mit konstanter Helligkeit, solange man keine Töne auslöst. Beim Eintreffen von Tonfrequenzen ist der Widerstand des hell beleuchteten Fotowiderstands gering. Die Tonfrequenzen werden mit voller Lautstärke weitergeleitet. Unmittelbar darauf wird die Lampe mit einer *Steuerschaltung* langsam zum Erlöschen gebracht (Bedingung: Wenigstens eine Taste muß gedrückt bleiben, bis die Lampe nicht mehr leuchtet). Mit Abnahme der Beleuchtungsstärke vergrößert sich der Innenwiderstand des Fotowiderstands erheblich, und das NF-Signal wird dementsprechend immer leiser. Es ergibt sich der in Bild 6.22a dargestellte Pegelverlauf der Tonfrequenzspannung. Läßt man, nachdem ein Schlageffekt verklungen ist, alle Tasten los, so leuchtet die Lampe

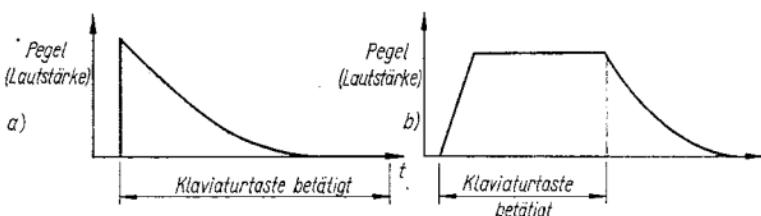


Bild 6.22 Lautstärkepegelverlauf beim Betätigen einer Taste; a - Perkussionseffekt, b - Abklingeffekt (Sustaineffekt)

sofort wieder hell auf, und der eben geschilderte Vorgang kann erneut eingeleitet werden. Der schaltungstechnische Aufbau des Perkussionseffekts wird später noch beschrieben.

Es gibt auch Schaltungen, bei denen die Lampe erst beim Betätigen von Tasten hell aufleuchtet. Verbleiben die Tasten in der gedrückten Stellung, so folgt dem Aufleuchten der Lampe ihr langsames Verlöschen. Der beim Perkussionseffekt entstehende Klang verändert sich mit der Registerwahl im Klangformungsteil, er kann daher dumpf oder glöckchenhell ausfallen. Bisweilen werden in die Instrumente aber auch spezielle Perkussionsregister eingebaut. Flackert die Lampe — durch einen Generator gesteuert — fortwährend impulsartig, so entsteht ein Mandolinentremolo, das häufig mit *Repeat-Perkussion* (Wiederholungs-Perkussion) bezeichnet wird.

Im Gegensatz zur Perkussion verklingt beim Sustain (Bild 6.22b) der Ton erst, nachdem die Tasten losgelassen wurden. Nach Abschnitt 2.3. ist je Taste eine *Regelstufe* (Bild 6.23) erforderlich, um den Abklingeffekt zu verwirklichen. Die Sustainregelstufen haben eine den Tastenkontakten ähnliche Funktion (Weiterschalten der Tonfrequenzen). Am Eingang der Regelstufen, von denen jeder Taste eine bestimmte zugeordnet ist, liegen die jeweils richtigen Tonfrequenzen der 8'-Tonlage oder noch weitere Chöre (16',

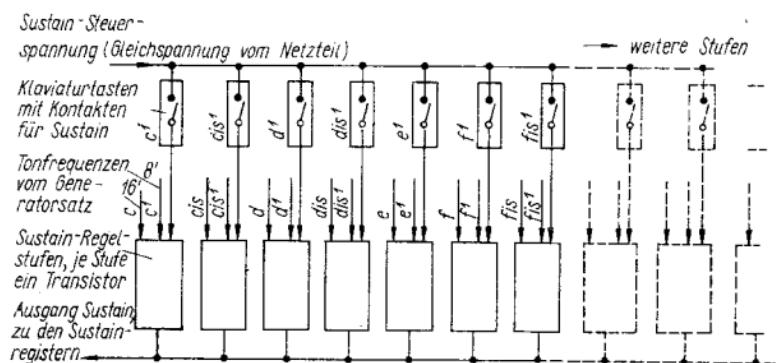


Bild 6.23 Sustain 8' + 16' (jeder Klaviaturtaste ist eine Regelstufe zugeordnet)

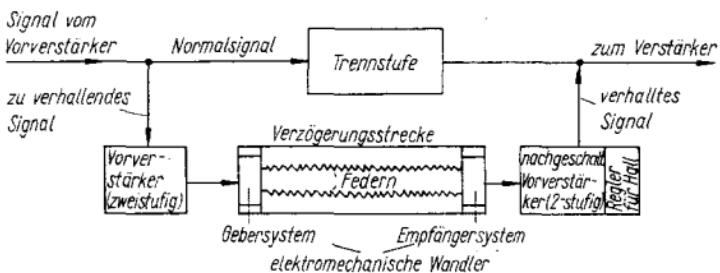


Bild 6.24 Übersichtsschaltplan einer Federhalleinrichtung mit Trennstufe

eventuell auch 2') ständig an. Die Tonfrequenzen kommen direkt vom Generatorsatz. Solange keine Taste betätigt wird, sperren z. B. die Transistoren in den Regelstufen die Tonfrequenzspannungen, so daß sie nicht zu den Sustainregistern im Klangformungsteil und zum Ausgang des Instruments gelangen können. Beim Betätigen von Tasten öffnet eine *Steuerspannung* die ihr zugeordneten Regelstufen, und es erfolgt der Toneinsatz. Nach Loslassen der Tasten werden die Regelstufen nicht plötzlich, sondern nur langsam verriegelt, so daß die Töne bis zu ihrer vollen Sperrung nach und nach verklingen. Die Abklingzeit läßt sich bis maximal 3 s kontinuierlich einstellen. Das Klangbild ähnelt dem gezupfter Saiteninstrumente. Bei entsprechender Auslegung der Sustainregister können auch *klavier-, spinett-, harfen- oder xylophonartige* Klänge erreicht werden.

Eine Halleinrichtung wurde schon in Abschnitt 2.1. kurz erläutert. Bild 6.7 zeigt ihre Einfügung in die Schaltung eines elektroakustischen Musikinstruments. Am gebräuchlichsten sind *Federhallstrecken*. Nach Bild 6.24 besteht eine Federhalleinrichtung aus einem *Vorverstärker*, der *Verzögerungsstrecke* und einem *nachgeschalteten Vorverstärker*.

Die in der Verzögerungsstrecke aufgehängten Federn dienen als *Lautzeitglieder*. Ein Gebersystem (*Motorprinzip*) erteilt den Windungen der Spiralfedern *Drehimpulse* im Takt der Tonfrequenzen. Am anderen Ende der Federn treffen die mechanischen Schwingungen *zeitverzögert* ein.

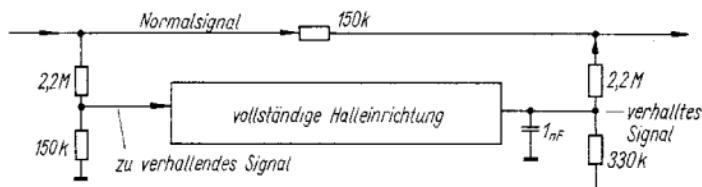


Bild 6.25 Übersichtsschaltplan einer Federhalleinrichtung mit Entkopplungswiderständen

Außerdem schwingen die Federn nach, wodurch sich der Nachhalleffekt gut ausbildet. Ein Empfängersystem (ein *elektromechanischer Wandler* nach dem Prinzip eines *Wechselstromgenerators* aufgebaut) nimmt die Feder-Schwingungen ab und wandelt diese wieder in analoge Tonfrequenzspannungen um. Der nachgeschaltete Verstärker gleicht die bei der Verhllung an der Verzögerungsstrecke entstandenen Tonfrequenzspannungsverluste aus. Das verhallte Signal wird den unverhallten Tonfrequenzspannungen beigemischt. Die der Hallstrecke parallelgeschaltete Trennstufe kann auch durch ein *Widerstandsnetzwerk* nach Bild 6.25 ersetzt werden. Die zu erreichende Entkopplung ist jedoch schlechter als bei einer Röhren- oder Transistor-Trennstufe.

Die Nachhallzeit wird durch die Verstärkungsregelung des Nachhallverstärkers eingestellt. Bei Federhallstrecken gibt es noch einige Probleme mit *Eigenresonanzen* und Fragen des *Frequenzgangs*. In der Literatur werden noch andere Methoden zur Erzeugung eines künstlichen Nachhalls beschrieben. Die erzielbaren Qualitätsverbesserungen sind aber mit einem ziemlich großen Aufwand verknüpft. Bei Federhallstrecken entstehen Ein- und Ausschwingvorgänge, die das Klangbild elektroakustischer Musikinstrumente sehr günstig beeinflussen. Deshalb sollte auf den Einbau einer Federhalleinrichtung nicht verzichtet werden.

Im Handel gibt es Verstärker mit eingebauten Halleinrichtungen (*Regent*, VEB Musikelektronik Klingenthal). Einige Instrumente werden von der Industrie auch mit Halleinrichtung geliefert (z. B. TO 200/5, ein vollelektronisches

Tasteninstrument vom VEB *Klingenthaler Harmonika-werke*).

Ein nicht direkt zur Klangformung gehörendes Gebiet ist die Erzeugung von Begleitrhythmen mit elektronischen Schlagzeugen. Es gibt sehr komplizierte Schaltungen, die nicht nur Schlageffekte, sondern selbständig oder in Verbindung mit Polyphonen auch *Begleitakkorde* in allen Tonarten und Rhythmen hervorbringen. Größere elektronische Schlagzeuge lassen sich auch in Tanzorchestern für Schlagzeugsolopartien einsetzen.

Beim Anschluß eines elektronischen Schlagzeugs mit Begleitautomatik an ein Polyphon erspart man sich das Spielen der taktgebenden Begleitnoten und kann sich auf die melodieführenden Stimmen konzentrieren. Das erleichtert dem weniger Geübten das Spielen auf einem Polyphon oder auf einer elektronischen Orgel wesentlich. Ausgefeilte Schlagzeugschaltungen passen das Tempo der Schlageffekte und Begleitakkorde sogar in gewissen Grenzen an die Takthaltung des Spielers an, sie reagieren auf Verzögerungen. Eine schaltungstechnische Beschreibung oder eine Bauanleitung für ein elektronisches Schlagzeug kann wegen des zu großen Umfangs der technischen Einzelheiten nicht gegeben werden. In den kommenden Jahren erscheinen aber sicher Veröffentlichungen für den Amateur, die den Selbstbau von Schlagzeugen ermöglichen.

## 6.6. Lautstärkeregelung

Über Lautstärkeschweller wurde schon berichtet. Die Dynamik eines elektroakustischen Musikinstruments kann durch geschickte Betätigung der Schweller sehr wirksam erweitert werden. Geübte Musiker modulieren länger an gehaltene Töne einzeln mit dem Schweller und beleben dadurch das Klangbild stärker, als das mit anderen Effekten erreicht wird.

In der Regel weisen die Instrumente nur einen Schweller auf. Er liegt am Ausgang der Gesamtschaltung, wird meist mit dem Fuß bedient und wirkt auf das gesamte Aus-

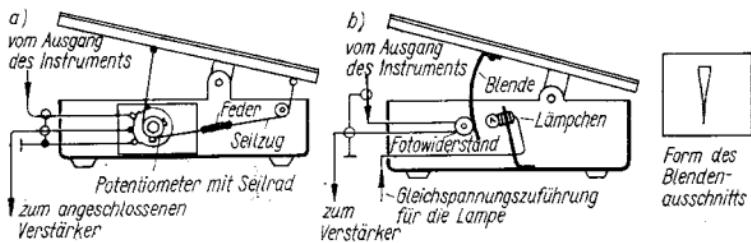


Bild 6.26 Fußschweller zur Lautstärkeregelung; a - mit Potentiometer, b - mit Fotowiderstand (z. B. CdS 8)

gangssignal des Instruments. Es können auch mehrere Schweller, z. B. einer für jede Tastenebene, eingebaut werden. Gebräuchlich sind potentiometerbestückte Konstruktionen, die nach Bild 6.26a mit Zahnstangengetrieben oder Seilzügen arbeiten. Verschleißfester und geräuschrämer sind *fotoelektrische* Schweller gemäß Bild 6.26b.

Lautstärkeregler benötigt man außerdem bei größeren Instrumenten zur Anpassung der Ausgangsspannungen der verschiedenen Tastenebenen oder Effekteinrichtungen untereinander (Lautstärkeanpassung bei unterschiedlicher Registrierung). Diese Regler sind meistens am Spieltisch für die Bedienung von Hand angebracht. *Mehrkanalig* ausgelegte Instrumente mit getrennten Verstärkern für die Bass- und Diskantbereiche werden mit *Tandempotentiometern* bestückt (Spezialpotentiometer mit 2 hintereinander angeordneten Schleiferbahnen, deren Schleifer eine gemeinsame Achse haben). Derartige gleichlaufende Regler sind allgemein bei *stereofonenen* Geräten zu finden.

*Knieschweller* werden durch seitliches Bewegen des Knies betätigt. Man verwendet sie zum Einblenden von *Effektklängen*. Als Lautstärkeregler mit der Funktion eines Gesamtschwellers sind Knieschweller selten eingebaut worden.

Im erweiterten Sinn können alle Effekte, die die Lautstärke beeinflussen (*Perkussion, Tremolo, Sustain*), mit zur Lautstärkeregelung gezählt werden.

## 6.7. Vorverstärker

Bei NF-Verstärkern wird zwischen Vorverstärker- und Endstufen unterschieden. Außerdem gibt es noch Hilfsstufen zur *Phasenumkehr*, *Entzerrung*, *Mischung*, *Anpassung* usw.

Vorverstärker bestehen meistens aus mehreren hintereinandergeschalteten Röhren- oder Transistorstufen. Sie müssen die Tonfrequenzspannungen so hoch verstärken, daß die Endstufen ausgesteuert werden können.

Die von den Tongeneratoren abgegebenen Tonfrequenzspannungen betragen in der Regel einige Volt. Da aber im Übertragungsweg zwischen den Generatoren und der Endstufe viele Spannungsteiler (Filterschaltungen, Klangregelglieder und Entkopplungswiderstände) liegen, treten beträchtliche Pegelverluste auf. Am Ausgang des Klangformungssteils liegen oft nur noch einige Millivolt Tonfrequenzspannung an. Um diese Verluste auszugleichen, werden zusätzliche Vorverstärkerstufen eingefügt.

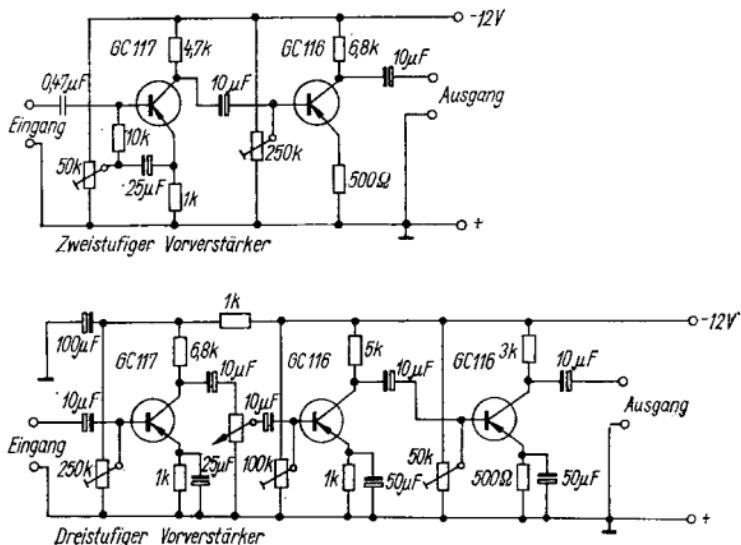


Bild 6.27 Stromlaufpläne für Vorverstärker (zum experimentellen Aufbau können Basteltransistoren verwendet werden); a - 2stufiger Vorverstärker, b - 3stufiger Vorverstärker

Die Stufen müssen *hohe Verstärkung* aufweisen, *brumm-, mikrotonie-* (kling-) und *rauscharm* arbeiten und die erforderliche *Bandbreite* (Frequenzübertragungsbereich) haben. Ferner müssen die Ein- und Ausgangswiderstände der Vorverstärker richtig an die weiteren Stufen des Übertragungsweges *angepaßt* sein.

In Bild 6.27 sind 2 Stromlaufpläne für Vorverstärker dargestellt.

## 6.8. Leistungsverstärker und Lautsprecher

An elektroakustische Musikinstrumente werden häufig getrennt aufgestellte NF-Verstärker und Lautsprecher angeschlossen. Es kommen meist Normverstärker oder speziell für Musikinstrumente entwickelte Verstärker zum Einsatz. Diese NF-Verstärker weisen nicht nur die Endstufen (Leistungsverstärkerstufen), sondern noch Treiber-, Klangregel- (Misch-), Mikrofonvor- und Phasenumkehrstufen neben anderen auf. Die Verstärker sind mit Eingängen verschiedener *Empfindlichkeit* und mit Ausgängen unterschiedlicher *Impedanzen* (Lautsprecheranschlusswerte) ausgestattet.

Normverstärker haben *100-V-Ausgänge* (25 W an  $400\ \Omega$ ). Die Ausgangsleistungen anderer handelsüblicher Verstärker sind verschieden (normal etwa zwischen 10 W und 40 W). Die Leistungsangabe bezieht sich entweder auf *Musik-* oder auf *Sinusdauertonleistung*. Bei der Angabe *Musikleistung* erscheinen bei dem gleichen Verstärker stets höhere Wattzahlen als bei der Angabe *Sinusdauertonleistung*.

Außerdem muß der zur Leistung gehörende *Klirrfaktor* beachtet werden. Die Ausgangsleistung *eines* Verstärkers liegt bei 5 % Klirrfaktor wesentlich höher als z. B. bei nur 1,5 % Klirrfaktor.

Für Hausmusikinstrumente reichen je nach Raumgröße 6 bis 10 W Sinusdauertonleistung aus. Für eine elektronische Hausorgel, die in einer größeren Diele oder in einem Hausflur betrieben wird, kann man auch höhere

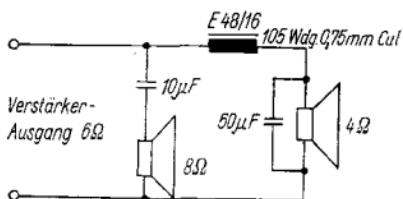
Leistungen veranschlagen, wenn dadurch niemand belästigt wird. Für die Tonabstrahlung sind Schallwände oder große Lautsprecherboxen geeignet.

Der *Frequenzgang* des verwendeten Verstärkers sollte im Bereich von 30 bis 15 000 Hz möglichst linear, aber in weiten Grenzen *regelbar* (Klangregeleinrichtung) sein. Verstärker mit nichtlinearen Verzerrungen (Klirrfaktor) über 2 %, gemessen bei der *Nennausgangsleistung* und einer Frequenz von 1000 Hz, sind *ungeeignet*.

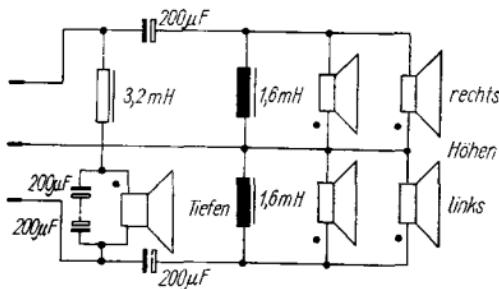
Beim Einbau der Leistungsverstärker in die Spieltischgehäuse sollten transistorisierte Ausführungen vorgezogen werden, denn ihr *Wirkungsgrad* liegt gegenüber röhrenbestückten höher. Röhrenverstärker entwickeln viel Wärme, die zur Aufheizung des Innenraums der Instrumente beiträgt. Für eine ausreichende Wärmeabführung ist in jedem Fall zu sorgen.

Lautsprecher wandeln die von den Endstufen abgegebene elektrische Leistung (*Sprechleistung*) in akustische Schallleistungen um. Sie sind die schwächsten Glieder in elektroakustischen Übertragungsanlagen mit einem sehr geringen Wirkungsgrad, der nicht höher als 2 bis 4 % liegt. In jedem Fall sollten Qualitätsergebnisse und statt einzelner Systeme Lautsprecherkombinationen verwendet werden, um möglichst gute Abstrahlbedingungen für alle Frequenzen zu erhalten. Mit zunehmender Aussteuerung der einzelnen Systeme erhöhen sich die von den Lautsprechern selbst verursachten Verzerrungen. Eine erhebliche Überdimensionierung der Lautsprecherleistung gegenüber der Verstärkerausgangsleistung schafft Abhilfe. Eine große Rolle spielt auch die Anordnung der Lautsprecher.

Bei einkanaliger Wiedergabe (nicht voneinander getrennte Verstärker und Lautsprecher für hohe und tiefe Frequenzen) dürfen tiefe Frequenzen nicht zu stark abgestrahlt werden, weil sonst die Höhen zu rauh klingen. Das Klangbild ist dann nicht gut. In diesem Fall sind getrennte Lautsprecher für Höhen und Tiefen mit *Frequenzweichen* besser, so daß die hohen Frequenzen nicht auf die Tieftonlautsprecher und die tiefen Frequenzen nicht auf die Hochton-



**Bild 6.28**  
Lautsprecherkombinationen mit eingebauten Frequenzweichen; a - Lautsprecherbox des Rundfunkempfängers *Transstereo*, b - Lautsprecherkombination einer von 2 Boxen eines Stereoverstärkers



lautsprecher gelangen. Weiterhin dürfen die Schallwellen der Tieftonlautsprecher nicht zu stark auf die Hochtonlautsprecher einwirken. Auch dann ist keine saubere Höhenwiedergabe möglich. Diese Erscheinung tritt weniger auf, wenn die Hochtonlautsprecher geschlossene Körbe haben oder von den Tieftonlautsprechern getrennt in separate Kammern einer Box eingebaut werden. Noch besser sind spezielle Baß- und Hochtonboxen, eventuell auch eine für mittlere Tonlagen. Man stellt die Boxen etwas entfernt voneinander auf. Die günstigste Aufstellung hängt wesentlich von den raumakustischen Verhältnissen ab. Die Verschmelzung der einzeln abgestrahlten Frequenzbereiche zu einem ausgeglichenen Klangbild darf nicht verlorengehen. Die besten Ergebnisse werden durch eine mehrkanalige Wiedergabe erreicht (Verstärker und Lautsprecher gesondert für jeden Frequenzbereich verwenden). In diesem Fall müssen die Ausgänge am jeweiligen Musikinstrument mehrkanalig vorhanden sein. Bild 6.28 zeigt Lautsprecherkombinationen mit eingebauten Frequenzweichen.

Von Laien werden Lautsprecher oft falsch an die Verstärkerausgänge angepaßt. Die Folge ist eine Verringerung

der Ausgangsleistung. Bei groben Fehlanpassungen verschlechtert sich auch der Klang. Anpassungsfehler, die bereits zur Leistungsminderung führen, lassen sich gehörmäßig nicht feststellen. Man muß die Ausgangsleistung messen, um Fehler auffinden zu können. Da die Anschlußwerte der Lautsprecher und Verstärker fast immer bekannt sind, lassen sich die Anpassungsverhältnisse auch rechnerisch bestimmen oder überprüfen.

Verstärker mit dazu passenden Boxen werden im Handel angeboten. Die volkseigene Industrie fertigt u. a. 25-W-Normverstärker (VEB Funkwerk Kölleda); Produktions-

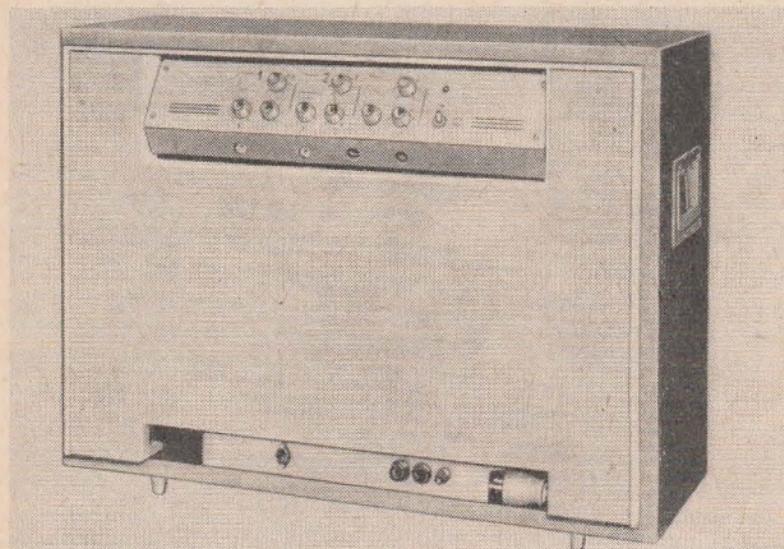


Bild 6.29 Verstärker Regent 30 mit eingebauten Lautsprechern.

Abmessungen:	740 mm $\times$ 575 mm $\times$ 300 mm
Gewicht:	22 kp
Stromversorgung:	110 V, 125 V und 220 V/50 Hz
Leistungsaufnahme:	etwa 110 W
Ausgangsleistung:	25 W Sinusdauertonleistung
Klirrfaktor:	1,5 % bei 1000 Hz
Frequenzbereich:	3 % bei 40 Hz und 10 kHz bei Aussteuerung bis zur Nennleistung (25 W)
Lautsprecher:	20 Hz bis 20 kHz $\pm$ 1,5 dB bei linearer Einstellung der Klangregler je 2 12,5-W-Breitbandsysteme (Anschluß für Außenlautsprecher vorhanden)

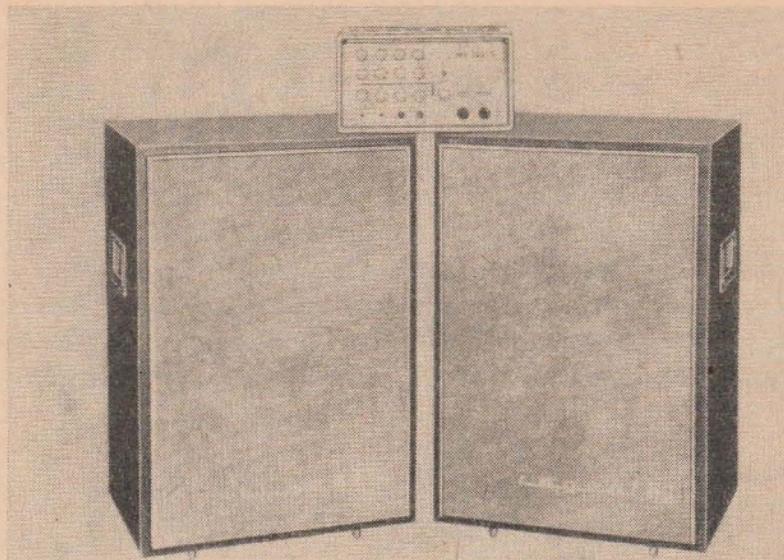


Bild 6.30 Verstärkeranlage *Regent 60* mit 2 Lautsprecherboxen.

4 getrennt regelbare Eingänge:

Eingang 1 und 2: Eingangsempfindlichkeit 5 mV

Eingang 3 und 4: Eingangsempfindlichkeit 100 mV

Getrennte Höhen- und Tiefenregelung für jeden Eingang

Frequenzbereich: 30 Hz bis 20 kHz  $\pm$  1,5 dB

Röhrenbestückung: 2 EL 34, 3 ECC 83, ECF 82, EM 84

Ausgangsleistung: 40 W Sinusdauertonleistung

Klirrfaktor: etwa 2 % bei 1000 Hz

Ausgangswiderstand: 6  $\Omega$  (2  $\times$  12  $\Omega$ )

Halbleiter: 2 SY 106, GY 105, OA 665

Abmessungen: Verstärker: 340 mm  $\times$  220 mm  $\times$  180 mm

Lautsprecher: Boxen: 740 mm  $\times$  575 mm  $\times$  400 mm

Gewicht: je Box 2 12,5-W-Breitbandsysteme

Verstärker: 14 kp

Box: 12 kp

Der Verstärker wird beim Transport im Lautsprechergehäuse untergebracht

genossenschaften bzw. kleinere volkseigene Betriebe bauen verschiedene andere Modelle (z. B. *Elektroartist*). Die Verstärker der *Regent*-Serie eignen sich sehr gut für den Anschluß an elektroakustische Musikinstrumente. Bild 6.29 zeigt den Verstärker *Regent 30*, Bild 6.30 gibt den Verstärker *Regent 60* wieder.

Für den Selbstbau qualitätsgerechter Verstärker stehen dem Amateur Bauanleitungen in Fachzeitschriften zur Verfügung (*radio und fernsehen, FUNKAMATEUR*).

## 6.9. Stromversorgung

Grundsätzliche Ausführungen zu Fragen der Stromversorgung elektroakustischer Musikinstrumente enthält der Abschnitt 4. Die Mehrzahl der Polyphone wird mit kleinen

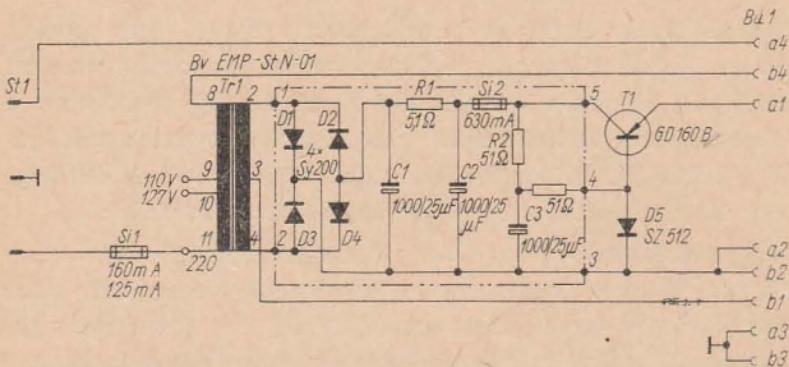


Bild 6.31 Netzteil der TO 200/5 (Stromlaufplan)

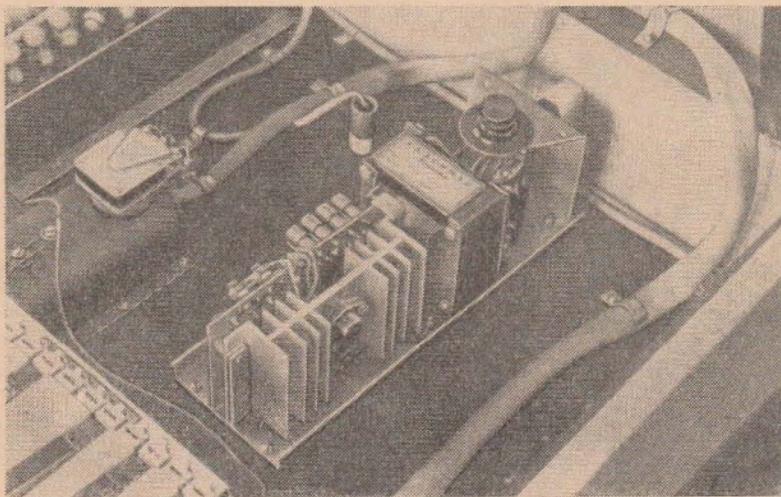


Bild 6.32 Ansicht des Netzteils der TO 200/5 (Montage im Spieltisch)

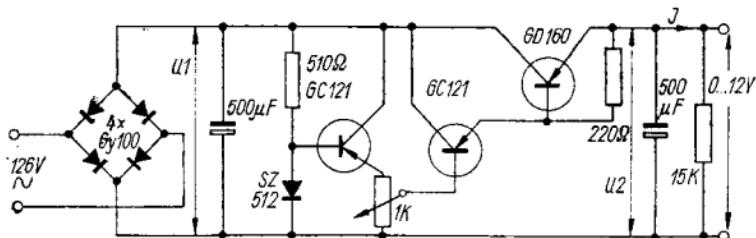


Bild 6.33 Stabilisierter Netzteil.

Ausgangsspannung: regelbar 0 bis 12 V

Verlustleistung T3:  $(U_1 - U_2) \cdot I \leq 0,5 \text{ W}$

*stabilisierten* Netzteilen ausgerüstet, wenn, wie üblich, keine Endverstärker in die Instrumente eingebaut werden. Bild 6.31 zeigt als Beispiel für einen solchen stabilisierten Netzteil den Stromlaufplan des Stromversorgungssteils des Polyphons TO 200/5 (*Weltmeister*). In Bild 6.32 ist die Lage des Netzteils im Inneren des Instruments zu sehen.

Zur Stromversorgung der verschiedenartigsten Instrumente eignen sich auch stabilisierte Netzteile nach Bild 6.33. Je nach Leistungsaufnahme des jeweiligen Instruments müssen aber die Bauelemente anders bemessen werden.

## 7. Schlußbetrachtungen

Die bisher erschienenen Veröffentlichungen über elektroakustische Musikinstrumente beziehen sich vorwiegend auf technische Informationen. Die kurzgefaßten Einführungen in das nicht nur technisch, sondern auch musikalisch zu betrachtende Thema reichen meist nicht aus, um das Grundwissen zum Verständnis der Schaltungstechnik der Instrumente zu vermitteln. Das gilt vor allem für den Aufbau und die Verdrahtungsprinzipien größerer Polyphone und elektronischer Orgeln, die sich auf Gesetzmäßigkeiten der Harmonielehre zurückführen lassen. Der Autor hofft, dem Leser einen tieferen Einblick in die technisch-musikalischen Zusammenhänge des Aufbaus elektroakustischer Instrumente gegeben zu haben.

Im 1. Teil wurde hauptsächlich mit Übersichtsschaltplänen und schematisierten oder vereinfachten Darstellungen gearbeitet. Auf die Beschreibung technischer Einzelheiten wurde vielfach verzichtet, um die Allgemeinverständlichkeit der Erläuterungen zu wahren. Weiterhin kam es zunächst darauf an, Begriffe zu erklären, die sowohl bei mechanischen als auch bei elektroakustischen Instrumenten gebraucht werden und in beiden Fällen prinzipiell die gleiche Bedeutung haben.

Im Text wurde auf 2 Lehrgänge [10], [11] hingewiesen. Sie bereichern den Inhalt des 1. Teiles vor allem von der technischen Seite her und sollten zusätzlich gelesen werden. Diese Empfehlung geht insbesondere an Leser, die sich mit praktischen Versuchen auf dem umfangreichen Gebiet der elektronischen Ton- und Klangerzeugung beschäftigen wollen und kaum Vorkenntnisse besitzen.

In der Fortsetzung des Themas werden am Anfang des 2. Teiles einige leicht ausführbare Versuche beschrieben. Sie demonstrieren sehr eindrucksvoll die grundsätzlichen Funktionen elektronischer Musikinstrumente.

Die Ausführungen in den folgenden Abschnitten und Teilen tragen vorzugsweise technischen Charakter und setzen Grundlagenwissen der Elektromechanik, Elektrotechnik und Elektronik voraus, das man sich aber bei ausreichendem Interesse mit den in den Literaturverzeichnissen angegebenen Schriften und Büchern aneignen kann.

## Literaturverzeichnis

- [1] *Autorenkollektiv*: Handbuch für Hochfrequenz- und Elektrotechnik, Band II; S. 588 bis 598. Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik GmbH, Berlin-Borsigwalde 1953
- [2] *Goedecke, W.*: Lehrbuch der Elektrotechnik; VEB Verlag Technik, Berlin 1953
- [3] *Hildebrand, S., S. Markert*: Zeichnungen und Darstellungen in der Elektrotechnik; VEB Verlag Technik, Berlin 1963
- [4] *Jakubaschek, H.*: Amateurtontechnik; Deutscher Militärverlag, Berlin 1967
- [5] *Jakubaschek, H.*: Transistorschaltungen I, II; Band 20 und Band 35 der Reihe „Der praktische Funkamateu", Deutscher Militärverlag, Berlin 1962/66
- [6] *Jakubaschek, H.*: Elektronikschaltungen für den Amateur; Band 28 und Band 66 der Reihe „Der praktische Funkamateu", Deutscher Militärverlag, Berlin 1964/67
- [7] *Jakubaschek, H.*: Radiobasteln leicht gemacht; Deutscher Militärverlag, Berlin
- [8] *Jakubaschek, H.*: Das große Elektronikbastelbuch; Deutscher Militärverlag, Berlin 1964
- [9] *Jobst, R.*: Zur Wirkungsweise und Dimensionierung des LC-Formantfilters; „Radio und Fernsehen", 1971, H. 19, S. 642
- [10] *Kupfer, K. H.*: Elektronische Orgeln; „Funktechnik", 1967, H. 6 bis H. 10
- [11] *Lesche, J.*: Einführung in die Technik der elektronischen Musikinstrumente; „Funkamateu", 1966, H. 1 bis H. 12
- [12] *Pabst, B.*: Grundschaltungen der Funktechnik; VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1958

- [13] *Rose, G.*: Fundamente der Elektronik; Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik GmbH, Berlin-Borsigwalde 1959
- [14] *Rumpf, K. H.*: Bauelemente der Elektronik; VEB Verlag Technik, Berlin
- [15] *Rumpf, K. H., M. Pulvers*: Transistor-Elektronik; VEB Verlag Technik, Berlin 1963
- [16] *Schlenzig, K.*: Von der Schaltung zum Gerät; Deutscher Militärverlag, Berlin 1968
- [17] *Schreiber, E.*: Die Ausgleichsvorgänge in der Musik und deren synthetische Nachbildung bei elektronischen Musikanstrumenten; „Radio und Fernsehen“, 1957, H. 13 bis H. 15
- [18] *Schreiber, E.*: Grundlagen der elektronischen Klang-erzeugung; „Radio und Fernsehen“, 1955, H. 22, S. 680 bis 684
- [19] *Streng, K. K.*: abc der Niederfrequenztechnik; Deutscher Militärverlag, Berlin 1968
- [20] *Streng, K. K.*: NF-Verstärker-Meßtechnik; Band 30 der Reihe „Der praktische Funkamateu“r, Deutscher Militärverlag, Berlin 1963
- [21] *Schubert, K. H.*: Elektrotechnische Grundlagen, I Gleichstrom, II Wechselstrom; VEB Verlag Technik, Berlin
- [22] *Schubert, K. H.*: Elektronische Effekte in der Tanzmusik; „FUNKAMATEUR“, 1971, H. 5
- [23] *Wahl, R.*: Elektronik für Elektromechaniker; VEB Verlag Technik, Berlin 1966
- [24] *Winckel, F.*: Elektronische Musik durch konzertreife Instrumente; „Funktechnik“, 1951, H. 1 und H. 2
- [25] *Winckel, F.*: Farbiges Spiel auf elektronischen Instrumenten; „Funktechnik“, 1951, H. 4 und H. 5

## Bildnachweis

- Bild 2.3 Entnommen aus: „Walker, Orgelbau Ludwigsburg“, Broschüre der Firma, 1925
- Bild 2.5 Entnommen aus: „Die große Walker-Orgel im städtischen Saalbau in Recklinghausen“, Verlag Tischer & Jagenberg GmbH, Köln 1926
- Bild 2.7 Entnommen aus: „Walker, Orgelbau Ludwigsburg“, Broschüre der Firma, 1925
- Bild 6.4 In Anlehnung an die Angaben in [1] gezeichnet
- Bild 6.5 Nach Angaben in „elektor“, 1971, H. 2, entworfen
- Bild 6.6 Nach Angaben in „elektor“, 1971, H. 2, entworfen
- Bild 6.7 Nach Angaben in „elektor“, 1971, H. 2, entworfen
- Bild 6.13 a) und c) Entnommen aus: [13]  
b) Entnommen aus: [23]
- Bild 6.15 Entnommen aus: [1]
- Bild 6.28 a) Entnommen aus: Stromlaufplan des Rundfunkempfängers „Transstereo“  
b) Entnommen aus „Der Transistor“, Telefunken-Fachbuch, Franzis-Verlag, München 1962
- Bild 6.29 Entnommen aus: Prospektmaterial der Firma Böhm KG<sup>5</sup>
- Bild 6.30 Entnommen aus: Prospektmaterial der Firma Böhm KG<sup>5</sup>
- Bild 6.31 Entnommen aus: Serviceunterlagen TO 200/5 (Weltmeister-Transistororgel)<sup>6</sup>
- Bild 6.33 Entnommen aus: „FUNKAMATEUR“, 1968, H. 2, S. 75

<sup>5</sup> Jetzt VEB Musikelektronik Klingenthal.

<sup>6</sup> VEB Klingenthaler Harmonikawerke.

Im Militärverlag der Deutschen Demokratischen Republik erscheinen im Jahre 1975 in der Reihe *electronica* voraussichtlich folgende Bände:

*Georg Engel*  
**Elektromechanische  
und vollelektronische Musikinstrumente,**  
Teil 1

*Georg Engel*  
**Elektromechanische  
und vollelektronische Musikinstrumente,**  
Teil 2

*Georg Engel*  
**Elektromechanische  
und vollelektronische Musikinstrumente,**  
Teil 3

*Georg Engel*  
**Elektromechanische  
und vollelektronische Musikinstrumente,**  
Teil 4

*Rolf Anders*  
**Transistorisiertes Kleinmagnetbandgerät,  
selbstgebaut**

*Klaus Schlenzig*  
**Amateurelektronik 75,**  
Teil 1

*Klaus Schlenzig*  
**Amateurelektronik 75,**  
Teil 2

*Günter Pilz*  
**Thyristoren – Eigenschaften und Anwendung**

Im Militärverlag der Deutschen Demokratischen Republik erscheinen im Jahre 1975 in der *Amateurbibliothek* folgende Bände:

*Hagen Jakubaschk*

**Amateurtontechnik**

*Klaus K. Streng*

**Transistordaten**

*Detlef Lechner*

**Kurzwellenempfänger**

*Karl Rothammel*

**Antennenbuch**





132

