

ZEITSCHRIFT DES VEREINES DEUTSCHER INGENIEURE

★ SCHRIFTFLEITER: C. MATSCHOSS ★

Bd. 76

SONNABEND, 30. JULI 1932

Nr. 31

Das elektrische Musikinstrument

Mechanisch-elektrische Schwingungserzeugung / Von O. VIERLING, Berlin

Mitteilung aus dem Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung

In Nr. 26 dieser Zeitschrift vom 25. Juni wurde das elektrische Musikinstrument behandelt, soweit die Schwingungserzeugung durch Elektronenröhren erfolgte; die folgende Arbeit geht auf die Lösungen ein, die auf mechanisch-elektrischer Schwingungserzeugung aufbauen. Es werden die Instrumente, die mit normalen Wechselstromerzeugern arbeiten, von Cahill, Hugoniot, Zouckermann, Béthenod usw. behandelt, ferner die Instrumente, denen das Poulsen-Verfahren, das Aufzeichnen von Tönen auf Stahl, zugrunde liegt, sowie die große Anzahl der photoelektrischen Tonerzeuger, die in ihrer neuesten Form nach den Erfahrungen im Tonfilm konstruiert werden. Einen größeren Raum nimmt die Behandlung der Instrumente ein, die sich auf gewöhnlichen Instrumenten aufbauen, wie der Bechstein-Siemens-Nernst-Flügel.

Tonerzeugung durch umlaufende Stromerzeuger

Th. Cahill hat [10,26]¹⁾ als erster ein elektrisches Musikinstrument gebaut, bei dem die für die einzelnen Töne benötigten Wechselströme durch umlaufende Wechselstromerzeuger hervorgebracht werden. Er verwendete bei seinen ersten Arbeiten einfache Unterbrecher, ist aber später beim endgültigen Ausbau seines Instrumentes zu gewöhnlichen Wechselstrommaschinen übergegangen. Er baute eine elektrische Riesenorgel, bei der auch alle Möglichkeiten vorgesehen waren, in verschiedenen Klangfarben polyphon zu spielen. Dabei lehnte er sich an die übliche Pfeifenorgel an und wählte zur Tonerzeugung eine ähnliche Anordnung, nämlich das Zusammensetzen von Klängen aus den einzelnen Teiltönen; dazu ist erforderlich, die einzelnen Teiltöne gesondert und möglichst sinusförmig zu erzeugen, um sie dann zu dem gewünschten Ton zusammenzufügen.

Für die chromatische Tonleiter von gleichschwebender Temperierung²⁾ benutzt Cahill 12 Mehrfachstromerzeuger, die den 12 aufeinander folgenden Noten der chromatischen Tonleiter c, cis, d, dis, e, f, fis, g, gis, a, ais, h entsprechen. Die Wellen dieser Stromerzeuger drehen sich im Ver-

hältnis der diesen Tönen eigenen Schwingungszahlen. Jede dieser 12 Wellen trägt dann bei einem Tonumfang von 7 Oktaven 7 Stromerzeuger, die den Grundton der 7 Oktaven einer bestimmten Note erzeugen, 6 Stromerzeuger, die die 3. Harmonischen und 5 Stromerzeuger, die die 5. Harmonischen geben, vergl. Abb. 1. Damit erhalten wir für einen Mehrfachstromerzeuger nachstehendes Frequenzschema, wenn f die Schwingungszahl des tiefsten Grundtons ist:

7 Oktaven des Grundtons $f, 2f, 4f, 8f, 16f, 32f, 64f,$
3. Harmonische $3f, 6f, 12f, 24f, 48f, 96f,$
5. Harmonische $5f, 10f, 20f, 40f, 80f.$

Die Reihe der Grundtöne geben also, auf den ersten Grundton bezogen, die 1., 2., 4., 8., 16. und 32. Harmonische, die Stromerzeuger der dritten Harmonischen die 3., 6., 12., . . . Harmonische und die Stromerzeuger der fünften Harmonischen die 5., 10., 20., . . . Harmonische. Jeder Note kann also der 1., 2., 3., 4., 5., 6., 8., 10., . . . Teilton zugeordnet werden. Für die höheren Töne steht dann allerdings keine so große Zahl von Obertönen mehr zur Verfügung, was aber den musikalischen Ausdruck nicht beeinträchtigt, da bei diesen hohen Tönen die Obertöne für die Klangfarbe nicht mehr sehr wesentlich sind.

Da ein Teiltonstromerzeuger die Obertöne für mehrere Töne liefert, ist er mit so vielen Wicklungen versehen, als er Teiltöne für die einzelnen Noten liefern muß, damit keine gegenseitigen Beeinflussungen auftreten. Betrachten wir z. B. die 7 Oktaven des C, so liefert der Stromerzeuger mit der Frequenz f den Grundton C_1 von 32 Hz; der Stromerzeuger von der Frequenz $2f$ liefert den Grundton des C von 64 Hz und den zweiten Teilton des C_1 von 32 Hz; der Stromerzeuger von der Frequenz $4f$ liefert den Grundton des c von 128 Hz, den zweiten Teilton des C von 64 Hz

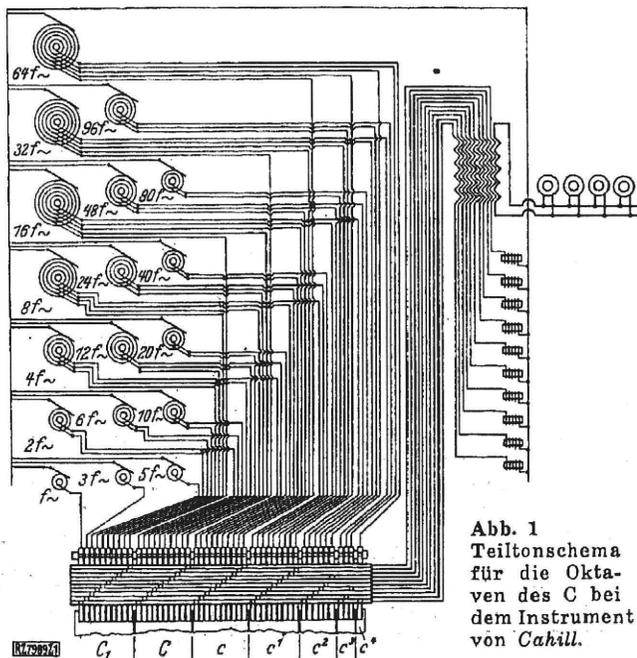


Abb. 1
Teiltonschema
für die Okta-
ven des C bei
dem Instrument
von Cahill.

¹⁾ Die in eckigen Klammern befindlichen Zahlen beziehen sich auf die Schriftumhinweise am Ende des ersten Teils des Aufsatzes; vergl. Nr. 26 vom 25. Juni 1932 S. 629.

²⁾ Beim Klavier steht für je zwei Halbtöne, z. B. für die beiden Töne cis und des, nur eine Taste zur Verfügung, da die Tastatur der alten Kastinstrumente beibehalten wurde. Würde diese Taste auf cis abgestimmt, so könnte man in einer Tonart, die cis benutzt, rein spielen. Für eine andere Tonart, in der des gebraucht wird, wäre aber die Verstimmung sehr groß. Um beide Tonarten spielen zu können, hat man sich entschlossen, einen mittlren Ton einzustellen, wodurch man zwar für beide Arten Verstimmungen erhält, die aber dadurch in erträglichen Grenzen bleiben. Die Schwingungszahlen in physikalischer reiner Stimmung für die Töne c, cis, des, d sind 256, 266 $\frac{2}{3}$, 276 $\frac{1}{3}$ und 288. Für die physikalisch temperierte Stimmung sind die Schwingungszahlen 256, 271,22 und 287,95. Der Mittelwert für cis und des weist nach beiden Seiten hin gleiche Verstimmungen auf und ergibt somit gleiche Schwabungen, woraus der Ausdruck „gleichschwebend temperiert“ entstanden ist.

und den vierten Teilton des C_1 von 32 Hz; der Stromerzeuger von der Frequenz $8f$ liefert den Grundton des c^1 von 256 Hz, den zweiten Oberton des c von 128 Hz, den vierten Teilton des C von 64 Hz und den achten Teilton des C_1 von 32 Hz.

Die Stromerzeuger der Frequenzen $16f$, $32f$ und $64f$ liefern die Grundtöne zu 512, 1024 und 2048 Hz, und jeder liefert den zweiten Teilton der eine Oktave tiefer liegenden Note, den vierten Teilton der zwei Oktaven tiefer liegenden Note, den achten Teilton der drei Oktaven tiefer liegenden Note und den 16. Teilton der Note, die vier Oktaven tiefer liegt als diejenige des Grundtons. Der Stromerzeuger von der Frequenz $3f$ liefert den dritten Teilton des C_1 von 32 Hz, der Stromerzeuger von der Frequenz $6f$ den dritten Teilton des C von 64 Hz und den sechsten Teilton des C_1 von 32 Hz.

Die Stromerzeuger von der Frequenz $12f$, $24f$, $48f$ und $96f$ liefern die dritten Teiltöne der Grundfrequenzen 128, 256, 512 und 1024 Hz. Jeder liefert auch den sechsten Teilton der eine Oktave tiefer liegenden Note und den 12. Teilton der Note, die zwei Oktaven tiefer liegt als diejenige, der er den dritten Teilton liefert. Ähnlich ist es mit den Stromerzeugern von der Frequenz $5f$, $10f$, $20f$, $40f$ und $80f$, die die fünften Teiltöne des C von 32, 64, 128, 256 und 512 Hz liefern. Jeder liefert auch den zehnten Teilton des C , das eine Oktave unter demjenigen liegt, dem er den fünften Teilton liefert.

In Abb. 1 ist die Tatsache, daß ein gegebener Stromerzeuger mehrere Stromkreise speist, durch eine Reihe von konzentrischen Kreisen angedeutet. Jeder der inneren Kreise entspricht der einen Klemme einer Ankerwicklung, während der äußere Kreis einen Schleifring darstellt, mit dem die andre Klemme jeder Ankerwicklung verbunden ist. Aus der Zeichnung ist deutlich das oben beschriebene Teiltonschema ersichtlich.

Cahill verwendete für die tiefen Töne Stromerzeuger besonderer Bauart, bei denen das Feld umläuft, für die hohen Töne Stromerzeuger, die unseren Hochfrequenzmaschinen sehr ähnlich sind. Der Läufer ist gezahnt, und in den ebenfalls gezahnten Polschuhen des Ständers, der die Erregerwicklung trägt, sind die einzelnen voneinander getrennten Ankerwicklungen untergebracht, die in der Zahl den zu liefernden Teiltönen entsprechen.

Um ein polyphones Spiel mit mehreren Registern wie bei der Orgel zu ermöglichen, brauchte *Cahill* auch mehrere Manuale, die er einfach durch Parallelschaltung erhielt. Jedes Manual rüstete er mit Registern aus, d. h. Vorrichtungen, mit denen er die Teiltonzusammensetzung nach Zahl und Amplitude beliebig einstellen konnte. Die elektrische Orgel von *Cahill* erforderte einen viel zu großen Aufwand, wenn sie auch recht befriedigende musikalische Ergebnisse hatte. Man braucht nur zu bedenken, daß 12×18 Wechselstromerzeuger notwendig waren, wozu dann noch die verschiedenen Mischeinrichtungen für die einzelnen Teiltöne kamen.

K. Ochs [27] versuchte deshalb eine Vereinfachung durch Anordnung von Stromunterbrechern auf Scheiben zu erzielen. Er teilte eine Scheibe entsprechend zwei Oktaven in 24 Kreisringe auf, die in Segmente zerlegt wurden. Durch Atzen jedes zweiten Segments und Ausfüllung mit Isolierstoff erhielt er einen Stromunterbrecher für 24 Frequenzen. 3 Scheiben wurden fest miteinander gekuppelt und liefen mit den Drehzahlen $1 : 4 : 16$, was ein Instrument mit 6 Oktaven ergab. Die gegenüber *Cahill* erreichte Vereinfachung ist aber nur scheinbar, denn sie beruht im wesentlichen auf einer Beschränkung der Kombinationsmöglichkeiten zum Erzeugen verschiedener Klangfarben.

E. Hugoniot [30] hat eine ganz andre Lösung ersonnen. Er wollte auch eine Vereinfachung erzielen, dabei aber den Reichtum an Klangfarben von *Cahill* bewahren. Die von ihm verwandten Stromerzeuger sind auch wieder unter einander gleich, nur laufen sie mit verschiedenen Drehzahlen. Jeder besteht aus einem *Grammeschen* Ring, über den die Wicklung aber nicht gleichmäßig verteilt ist, sondern bei dem die Windungen immer im Abstand von 60° konzentriert werden. Die Feldpole sind so gestaltet,

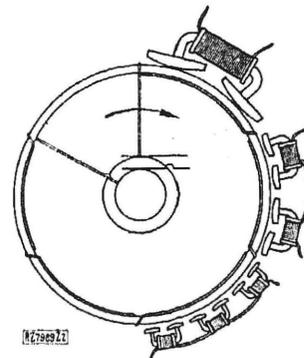
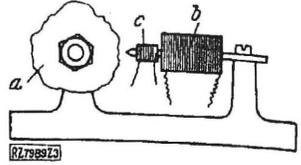


Abb. 2. Stromerzeuger von Hugoniot zum Erzeugen eines Tones mit seinen Obertönen.

Abb. 3 (unten)
Stromerzeuger von Hugoniot mit Stahlscheiben und darauf eingeschnittener Kurvenform.

a Stahlscheibe
b Erregerpole des Elektromagneten
c Induktionsspule, in der die in Töne umzusetzenden elektrischen Schwingungen entstehen



daß in jedem Segment — also jeweils 60° ausfüllend — 2 Pole, 4 Pole, 6 Pole, 8 Pole usw. untergebracht sind, vergl. Abb. 2.

Bei der Aufteilung in sechs Zonen erhielt *Hugoniot* im Anker sechs Frequenzen, die zueinander im Verhältnis der Polzahlen der in den einzelnen Zonen angeordneten Feldmagnete stehen. Diese sechs Frequenzen sind die ersten sechs Teiltöne eines Klanges. Um die Amplitude der einzelnen Teiltöne einzustellen, regelt man die Magnetisierungsströme für die einzelnen Feldmagnete einzeln. Bald darauf ging *Hugoniot* aber zu einer andern Ausführung der Wechselstromerzeuger über. Er benutzte gezahnte Stahlscheiben, deren Zähnezahlen den Teiltönen entsprechen und vor einem Elektromagneten umliefen, der mit einer Induktionswicklung versehen war. Noch später verwandte er für die Teiltöne keine besonderen Scheiben mehr, sondern hat die Zahnform gleich entsprechend der Kurvenform des gewünschten Tons ausgebildet, Abb. 3.

O. Fischer [37] benutzte ebenso gebaute Metallscheiben, die nach der gewünschten Kurvenform ausgeschnitten waren, und wählte ihre Durchmesser im Verhältnis der Tonhöhen. Um verschiedene Klangfarben zu erzeugen, bringt er mit Hilfe eines Pedals verschieden ausgeschnittene Scheiben vor den Magneten.

A. Zouckermann [44] arbeitete ebenfalls mit gezahnten Läufern, vor denen Induktionsspulen angeordnet wurden. Sein Verfahren bestand auch darin, die Klänge synthetisch aus Teiltönen zusammenzusetzen, deren Stärke geregelt wird. Er benutzte aber dazu nicht besondere Teiltonstromerzeuger, sondern jeder Grundstromerzeuger gab auch infolge der Anordnung mehrerer Induktionsspulen die Teiltöne für die andern Grundtöne. Das Verfahren wird verständlich, wenn wir uns klar machen, daß in einer Tonleiter, auf einem Ton aufbauend, die Obertöne für diesen Ton enthalten sind, und zwar sind für einen Ton mit der Frequenz f die Oktave der zweite Teilton mit der Frequenz $2f$, die Quinte von $2f$ der dritte Teilton mit der Frequenz $3f$, die nächste Oktave der vierte Teilton mit der Frequenz $4f$ usw. Die einzelnen Wechselströme hat *Zouckermann* mit geringer Stärke und großer Reinheit erzeugt und mischt sie dann, indem er jeweils alle entsprechenden Harmonischen zusammenfaßt, am Eingang eines Verstärkers. Mit dieser Anordnung bekam er mit verhältnismäßig geringem Aufwand ein in Klangfarben sehr veränderliches Instrument mit großem Tonumfang.

Beim Bau solcher Musikinstrumente war man bestrebt, besonders auffallende Klangfarben mit geringem Aufwand hervorzubringen. Aber selbst das Einschneiden der Kurvenformen in die Stahlscheiben zeitigte keine recht befriedigenden Ergebnisse; auch war es zu schwierig, die Kurven mit genügender Genauigkeit einzuarbeiten. *K. Fiala* [31] hat deshalb unter Benutzung des *Poulsen-Verfahrens* die Töne auf Stahlscheiben elektromagnetisch festgehalten, indem er die Klänge von Instrumenten über Mikrophon und Schreibmagnet aufnahm. Die so bespielten Scheiben waren in einem Instrument vereinigt und entsprechend ihrer Tonhöhe und Klangfarbe geordnet, so daß die Abtastmagnete, mittels

zugehöriger Tasten geschaltet, die Töne der Tonleiter entsprechend wiedergaben.

E. Hugoniot [32], R. Michel [35] und A. Douilhet [38] haben ebenfalls Instrumente nach dem Poulsen-Verfahren³⁾ entwickelt, vergl. Abb. 4. Diese unterscheiden sich nur durch die Einschaltvorrichtung und ihre Verbindung mit der Tastatur. Ferner haben diese Erfinder, entsprechend dem damaligen Stand der Technik, nach ihrer Meinung besonders geeignete Lautsprecher vorgeschlagen. Douilhet hat abweichend von anderen, die nur einen Ton auf je eine Scheibe aufgezeichnet hatten, auf einer Scheibe mehrere Töne untergebracht.

Bei all diesen Instrumenten wurden die Wechselströme schon so erzeugt, wie sie später hörbar gemacht werden sollen. Höchstens wurden durch Mischen verschiedener Frequenzen Veränderungen in der Klangfarbe erzielt. J. Béthenod [57] und O. Vierling haben etwa gleichzeitig Instrumente ausgeführt, die auch mit umlaufenden Stromerzeugern arbeiten, bei denen aber die erzeugten obertonreichen Wechselströme durch elektrische Mittel in der Klangfarbe beeinflusst werden.

Vierling hat eine einfache Möglichkeit angegeben, die Klangfarbe schon am umlaufenden Tonstromerzeuger zu verändern, indem er bei einer bestimmten Zahn- oder Lochform durch Ändern des Abstandes der Induktionsspulen vom laufenden Teil verschiedene Formen des induzierten Wechselstroms erzeugt. Auf diese Weise können von einer Loch- oder Zahnreihe bei Anordnung mehrerer Induktionsspulen mit verschiedenen Luftspalten mehrere Töne von ungleicher Klangfarbe gleichzeitig abgenommen werden.

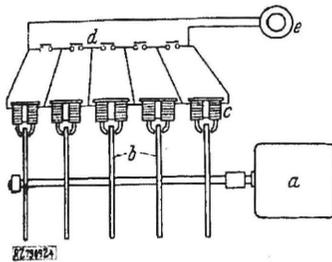


Abb. 4. Anordnung von Hugoniot nach dem Poulsen-Verfahren.

- a Antriebmotor
- b umlaufende Stahlscheiben, auf denen Töne von bestimmter Höhe und Klangfarbe elektromagnetisch festgehalten sind
- c Magnete zum Abnehmen der Töne
- d Tasten
- e Lautsprecher

Vierling hat ferner die Abstände der Zähne oder Löcher ungleich gewählt und einzelnen Zähnen oder Löchern eine abweichende Form gegeben, so daß beim Umlauf nicht nur eine gleichmäßige Frequenz, sondern außerdem noch eine bedeutend tiefere als rhythmischer Unterton erzeugt wird. Die herausfallende Loch- oder Zahnreihe kommt nur in einer bestimmten Stellung der Induktionsspule zur Wirkung. Diese rhythmische Untermauerung des Tons gibt bei entsprechender Wahl der Zahnform und bei genügend langsamer Aufeinanderfolge ein Vibrato. Geht der Vorgang schneller vor sich, so ergibt sich eine andre rhythmische Wirkung, die sich gegebenenfalls auch musikalisch auswerten läßt.

Durch eine geeignete Verstärkerschaltung wird das gleichzeitige Spiel in mehreren Klangfarben ermöglicht, d. h. ein Ausbau des Instruments für mehrere Manuale bei Verwendung einer einzigen Reihe von Tonstromerzeugern. In den einzelnen Leitungszweigen liegen dann elektrische Siebe oder auf Formanten abgestimmte Resonanzkreise, die die verschiedenen Klangfarben ergeben. Durch diese elektrische Ausbildung der Klangfarben vereinfacht sich der Bau einer elektrischen Orgel ganz bedeutend.

Photoelektrische Tonerzeugung

Die Eigenschaft photoelektrischer Zellen, ihren Widerstand mit der Beleuchtungsstärke zu ändern, hat man schon frühzeitig auch für elektrische Musikinstrumente ausgenutzt. Mit Hilfe umlaufender Schlitzscheiben wurden intermittierende Lichtstrahlen erzeugt, die in den Photozellen Wechselströme hervorriefen. E. Hugoniot [33] hat auf solchen Schlitzscheiben eine photoelektrische Orgel, Abb. 5 bis 7, aufgebaut. Um verschiedene Klang-

farben zu erzeugen, brachte er vor die Schlitzscheiben, Abb. 6, besondere Blenden, Abb. 7, die nach einer bestimmten Kurvenform ausgeschnitten waren und die Belichtung der Photozelle regelten. Der hervorgerufene Wechselstrom und der damit erzeugte Ton änderte also seine Klangfarbe beim Einsetzen verschiedener Blenden. Hugoniot verwendete eine Mehrzahl von Beleuchtungskörpern, deren Lichtstrahlen so gerichtet waren, daß sie alle auf eine Photozelle fielen. Das Gerät von Hugoniot glich mehr einer Versuchsanlage als einem fertigen Musikinstrument.

Thiring [17] dagegen hatte sein Superpiano fertig spielbar ausgebaut. Er verwendete ähnlich wie Cahill 12 Scheiben, jede mit 7 Lochkreisen, die im Oktavenverhältnis standen und mit 2, 4, 8, 16, 32, 64 und 128 Löchern versehen waren. An jeder Scheibe waren 7 Photozellen und 7 kleine Lampen angebracht, im ganzen 84 Lampen und 84 Photozellen. Durch die Klaviatur wurde die Belichtung der Photozellen eingeschaltet. Die erzeugten Wechselströme gingen dann über einen Verstärker zum Lautsprecher.

R. Michel [41] hat sich das inzwischen bekannt gewordene Verfahren der photographischen Aufzeichnung von Tönen, das wir beim Tonfilm benutzen, für elektrische Musikinstrumente schützen lassen. Er hat ein Instrument angegeben, Abb. 8, bei dem auf umlaufenden Scheiben die Töne photographisch festgehalten werden. Mit Hilfe von Lampen b, die wieder mittels Tasten c eingeschaltet werden, und Photozellen werden diese Töne über einen Verstärker und Lautsprecher wiedergegeben.

P. Toulon [47] ordnete Filmstreifen trommelförmig an; innerhalb der Trommel saß die Beleuchtungseinrichtung. Die ausgeblendeten Lichtstrahlen wurden mit Hilfe eines Hohlspiegels auf einer Photozelle gesammelt. Durch die Klaviatur wurden Blenden bedient, die beim Niederdrücken der Tasten den Weg für die einzelnen Lichtstrahlen freigaben. Toulon hat seinen Versuch noch weiter ausgedehnt und auf diese Filmstreifen Einzelbestandteile der Sprache, Vokale und Konsonanten, aufgezeichnet und machte auf diese Weise Versuche mit künstlicher Sprache.

Die Société de Recherches et de Perfectionnements Industriels hat sich verschiedene Anordnungen zum Erzeugen von Musik mittels Photozellen und umlaufender Scheiben in Einzelheiten der Ausführung schützen lassen. So wird insbesondere das Regeln der Beleuchtungsstärke mit Hilfe von Blenden in Abhängigkeit vom Tastendruck, die besondere Anordnung der zwölf eine Oktave umfassenden Lochkreise auf einer Scheibe, wobei die Scheiben dann mit doppelter, vierfacher usw. Drehzahl laufen, und andre nebensächliche Schaltmaßnahmen erwähnt.

E. Spielmann [48] hat ein photoelektrisches Instrument benutzt, das ähnlich wie das Thiring-Piano gebaut war. Er hat insbesondere die Tastatur mit der Einschaltvorrichtung ausgearbeitet. Beim Niederdrücken der Taste wird ein Widerstand allmählich ausgeschaltet, der im Lampenkreis liegt. Die Beleuchtung und somit die Lautstärke läßt sich also durch den Tastendruck regeln.

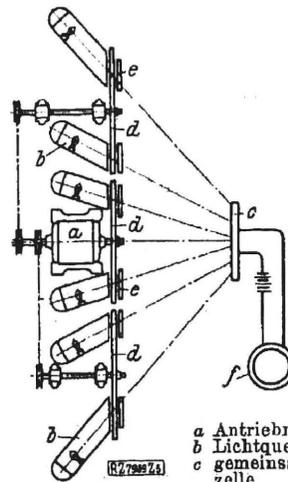


Abb. 6. Schlitzscheibe zur photoelektrischen Musikerzeugung.

Abb. 7. Blende mit bestimmter Kurvenform zum Erzeugen einer gewünschten Klangfarbe.

Abb. 5 bis 7. Photoelektrisches Musikinstrument von Hugoniot.

- a Antriebmotor
- b Lichtquellen
- c gemeinsame Photozelle
- d Schlitzscheiben (vergl. Abb. 6)
- e Blenden (vergl. Abb. 7)
- f Lautsprecher

³⁾ Vergl. ETZ Bd. 22 (1901) S. 57, Bd. 24 (1903) S. 752, Bd. 42 (1921) S. 1068, Bd. 51 (1930) S. 449.

Der Widerstand, der durch die Taste beeinflusst wird, ist selbst wieder einstellbar, damit man Ungleichheiten der Leuchtstärke der Lampen und der Empfindlichkeit der Photozellen ausgleichen kann.

A. Schmalz [59] hat eine Anordnung vorgeschlagen, bei der auch mit Schlitzscheiben und Blenden gearbeitet wird. Die Blenden sind lichtelektrisch aufgenommene Phonogramme, vergl. Abb. 9. Eine Vereinfachung seiner Apparatur erzielt er dadurch, daß er einer Schlitzreihe eine Mehrzahl von Phonogrammen zuordnet, die sich in der Klangfarbe und in der Tonhöhe unterscheiden. In der Tonhöhe sind die Phonogramme nicht beliebig, sondern sie stehen zueinander im Oktavenverhältnis. Die einzelnen Töne werden dann wieder mittels einer Klaviatur geschaltet.

L. Kent [58] gibt ein photoelektrisches Instrument mit umlaufenden Scheiben an, auf denen kreisförmig Phonogramme angeordnet sind. Ferner beschreibt er noch Anordnungen, die durch Umschalten ein mechanisches Spiel auf seinem Instrument erlauben.

Bei den photoelektrischen Instrumenten machte es anfangs Schwierigkeiten, reine Töne hervorzubringen. Bei Verwendung von Schlitzscheiben wird die Photozelle, während der Schlitz an der Blende vorbeistreicht, stark belichtet und bleibt dann bis zum Auftreffen des nächsten Schlitzes unbelichtet. Damit ergaben sich ungefähr Rechteckkurven. Man bildete daher die Blenden so aus, daß beim Aufgleiten des Schlitzes auf die Blende die Lichtmenge allmählich zunahm und dann allmählich wieder abnahm. Sinusströme erhielt man aber erst, als man Blendengröße und Schlitzabstand so aufeinander abstimmt, daß der nächste Schlitz auf die Blende auftrifft, wenn der vorhergehende Schlitz die Blende verließ. Erst bei dieser Anordnung war es auch möglich, die Klänge von Phonogrammen naturgetreu wiederzugeben, da keine Zeiten auftraten, während deren die Belichtung null war und der Lichtstrahl stets an dem Punkt der Kurve einsetzte, an dem der vorhergehende Lichtstrahl das Phonogramm verließ. Daraus ist auch ersichtlich, daß bei Verwendung von mehreren Phonogrammen bei einer und derselben Schlitzreihe diese Phonogramme zwar beliebige, wiederkehrende Kurvenform haben können, ihre Periodenzahlen aber in einem ganzzahligen Verhältnis zueinander stehen müssen.

Tonerzeugung durch Umsetzen mechanischer oder akustischer Schwingungen in elektrische

Nachdem Verstärker und Lautsprecher so weit entwickelt waren, daß Instrumentenklänge über Mikrophon und Lautsprecher gut wiedergegeben werden konnten, lag der Gedanke nahe, Musikinstrumente unmittelbar mit solchen Einrichtungen zu versehen. C. Hammond [36] hat als Erster diesen Gedanken praktisch ausgeführt und damit eine neue Richtung in der Entwicklung des elektrischen Musikinstruments begründet. Er hat auf dem Resonanzkörper einer Geige ein Mikrophon angeordnet, das durch die Schwingungen des Resonanzkörpers er-

regt wird. Die so erzeugten Wechselströme gehen über einen Verstärker zum Lautsprecher. Hammond hat mit dieser Einrichtung volle Geigentöne erhalten.

Die Klänge von Instrumenten zu verstärken, ist besonders für solche Instrumente wesentlich, die nur geringe Lautstärke haben. Mit Hilfe dieser elektrischen Einrichtung können Instrumente, die nicht wegen ihrer geringen Spielfähigkeit, sondern nur wegen ihrer geringen Lautstärke für den Konzertsaal unbrauchbar sind, verwendungsfähig gemacht werden. W. Harden [45] hat eine Anordnung, ein Mikrophon auf einer Gitarre aufzubauen, angegeben. Für alle diese Instrumentenverstärkungen werden natürlich keine Mikrophone verwandt, die auf Luftschall, sondern solche, die nur auf mechanische Erschütterungen vom Instrumentenkörper aus ansprechen, weil sonst alle akustischen Störungen aus dem Raum durch den Lautsprecher ebenfalls wiedergegeben würden.

A. Zouckermann [40] verwendet dagegen ein Mikrophon, das auf Schallwellen anspricht. Er hat zu diesem Zweck sein Instrument so gebaut, daß es nach außen schalldicht abgeschlossen ist und im Innern durch eine Harmoniumeinrichtung Töne von geringer Lautstärke erzeugt. Diese Töne werden über Mikrophone, Verstärker und Lautsprecher zu Gehör gebracht. Durch mehrere Lautsprecher erzielt er verschiedene Klangfarben. Er benutzt Lautsprecher gewöhnlicher Art, solche mit Resonanzkörpern und schließlich einen Lautsprecher, bei dem er durch das System einen Klavierresonanzboden erregt. Eine Lautstärkenregelung erhöht die Spielfähigkeit.

Das Instrument von Zouckermann hat schon kein gewöhnliches Musikinstrument mehr, sondern ein Harmonium von ganz geringer Lautstärke, das allerdings noch die Eigenschaften des Harmoniums aufweist. Benutzt man aber die elektrische Verstärkung, so erübrigen sich die Instrumententeile, die nur der Tonverstärkung, d. h. der Abstrahlung des Tones vom schwingenden Klangkörper an die umgebende Luft dienen. An ihre Stelle treten die elektrischen Aufnahmeteile, die unmittelbar mit den schwingenden Klangkörpern, z. B. den Saiten, gekoppelt sind.

O. Vierling und fast gleichzeitig R. Kapp [54], S. Franko und W. Nernst und J. Compton [60] haben nach diesen Gesichtspunkten elektrische Musikinstrumente gebaut. Sie haben insbesondere elektrische Klaviere entwickelt, die keine Resonanzböden haben. Magnete nehmen die Schwingungen von den Saiten ab und setzen sie in elektrische um, die dann über Verstärker und Lautsprecher hörbar gemacht werden, vergl. Abb. 10. Vierling hat angegeben, wie man mit Hilfe solcher elektrischer Zusätze die Klangfarbe der gebräuchlichen Instrumente regeln und den Ton in schwachen Lagen verstärken kann. Eine Anwendung dieses Gedankens hat sich in der Diskantverbesserung für Flügel ergeben.

W. Nernst hat in Zusammenarbeit mit H. Driescher [61] eine besondere Mechanik für diese elektrischen Musikinstrumente entwickelt. Da die Saiten keinen schweren Resonanzboden mehr in Schwingung versetzen müssen, können sie bedeutend leichter ausgeführt und auch schwächer erregt werden. Nernst verwendet deshalb zum Anschlagen Hämmer von ganz geringer Masse, sogenannte Mikrohämmer, Abb. 11. Durch diesen schwachen Anschlag werden technische Schwierigkeiten, die sich bei der Umformung der Saitenschwingungen in elektrische ergeben, beseitigt.

Die Verwendung des leichten Anschlags und dünner Saiten ergibt Verhältnisse, wie sie beim Tangentenklavier aus der Zeit Bachs vorlagen. Bei Instrumenten mit geringer Erregung ist die

Abb. 8 (unten). Instrument von Michel mit photographischer Tonaufzeichnung.

- a umlaufende Scheibe mit photographisch aufzeichneten Tönen
- b Lichtquelle
- c Tasten zum Einschalten der Lichtquelle
- d Photozelle
- e Verstärker
- f Lautsprecher
- g Antriebmotor

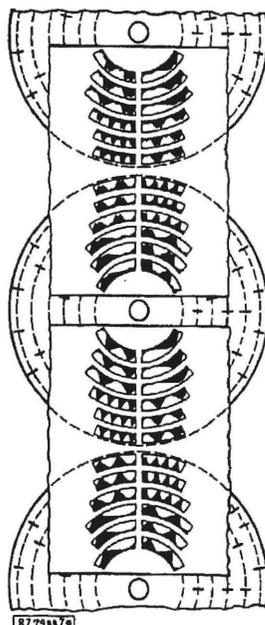
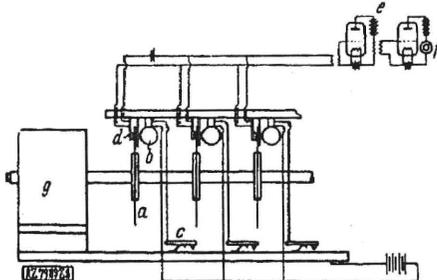


Abb. 9. Lichtelektrisch aufgenommene Phonogramme als Blenden vor den Schlitzscheiben; Anordnung von Schmalz.

Die Phonogramme auf den äußeren drei Kreisbögen geben die Oktaven zu den Tönen auf den inneren Kreisbögen.

Dämpfung verhältnismäßig klein, da die Abstrahlung eine unwesentliche Rolle spielt. Man hatte deshalb schon beim Tangentenklavier besondere Dämpfer vorgesehen, die man auf die Saiten mit Hilfe eines Registerzuges des sogenannten „Lautenzuges“ auflegen konnte. Diese Dämpfer bewirkten neben einer Verringerung der Nachklingzeit eine angenehme Beeinflussung der Klangfarbe. Auch *Nernst* hat diese Vorrichtung bei seinem Flügel eingebaut. Durch die elektrische Verstärkung kommt sie erst recht zur Geltung.

B. Bizos [20] und *O. Vierling* haben Streichinstrumente gebaut, bei denen ebenfalls die mechanischen Schwingungen in elektrische umgewandelt und über den Lautsprecher wiedergegeben werden. Die Besonderheit ihrer Versuche bestand aber darin, daß durch Verändern der Stimmung auf der Geige beispielsweise Streichbaß gespielt werden konnte; denn die Größe des Instrumentenkörpers spielt keine Rolle mehr, weil die tiefen Schwingungen durch den Lautsprecher in voller Stärke wiedergegeben werden können. Ferner haben sie Mittel zur Klangfarbenbeeinflussung eingeschaltet, die die Kurvenform so verändern, daß ganz anders geartete Klänge aus dem Lautsprecher kommen. Dabei werden die elektrischen Schwingungen mit Formanten versehen, die z. B. Blasinstrumente, Klarinette, Oboe usw. haben, so daß man auf der Geige Klarinette usw. spielen könnte.

Bei elektrischen Musikinstrumenten ist das Verfahren, durch Ändern der Kurvenform der Töne verschiedene Klänge zu erhalten, sehr weitgehend durchgebildet worden. Dabei wurde bisher die Wichtigkeit des zeitlichen Verlaufs der Intensität der Schwingung für den Klangeindruck wenig beachtet. Dieser Intensitätsverlauf ist aber in hohem Maße bestimmend für den Klangcharakter. Nur so ist es erklärlich, daß z. B. bei ganz schlechter Rundfunkwiedergabe, bei der der Lautsprecher die Kurvenform, also die einzelnen Teiltöne, nicht bringt, die Instrumente doch klar erkannt werden können; denn der Lautsprecher verursacht zwar eine starke Frequenzverzerrung, aber eine geringe Amplitudenverzerrung.

Sehr deutlich wird die Wichtigkeit des Intensitätsverlaufs für den Klangeindruck durch folgenden Versuch: Auf einer Schallplatte ist ein Klavierstück aufgenommen. Das Grammophon gibt das Klaviersolo einwandfrei wieder. Läßt man diese Platte rückwärts laufen, so hört man ein Orgelsolo, und zwar aus folgendem Grunde: Der Klavierton erreicht unmittelbar nach dem Anschlag den Höchstwert seiner Amplitude und klingt dann langsam ab, während der Orgelton allmählich anschwingt und plötzlich abklingt, also umgekehrt wie beim Klavier. Man hört somit das Abklingen des Klaviertones als Anklingen des Orgeltons. Obwohl die Kurvenform bei dem Versuch nicht geändert wird, ist der Klangeindruck ganz verschieden.

O. Vierling hat deshalb bei seiner Klavierorgel Schaltungsvorrichtungen angebracht, die ein verschiedenes An- und Abklingen des Tons einzustellen erlauben. Es ist so möglich, den Intensitätsverlauf der Töne verschieden zu beeinflussen. Dieses rein elektrische Verfahren unterstützt er durch eine neuartige Anwendung der mechanischen Saitenschwingung.

Bei den bisher gebräuchlichen Saiteninstrumenten, auch bei den mechanisch-elektrischen Instrumenten oben beschriebener Art, wird im wesentlichen nur eine Schwingung des mechanischen Schwingkörpers, der Saite, ausgenutzt. Mechanische Schwingungserzeuger haben aber die Eigenschaft, infolge ihrer vielen Freiheitsgrade in den verschiedensten Formen zu schwingen. *Vierling* hat festgestellt, daß die einzelnen Schwingungsformen ihre Energien an andre abgeben, woraus sich für die verschiedenen Schwingungsformen verschiedene Intensitätsverläufe ergeben. Wird z. B. der mechanische Schwingungserzeuger durch Anschlag erregt, so hat man in der Anschlagrichtung entsprechend dieser Schwingungsform einen Intensitätsverlauf, der dem Klavierton entspricht. Von dieser ersten Schwingungsform wird an eine zweite Schwingung in einer andern Ebene Energie abgegeben, wodurch die zweite Schwingung sich allmählich aufschauelt. Wird diese in der Amplitude allmählich anwachsende Schwingung elektrisch wirksam gemacht und

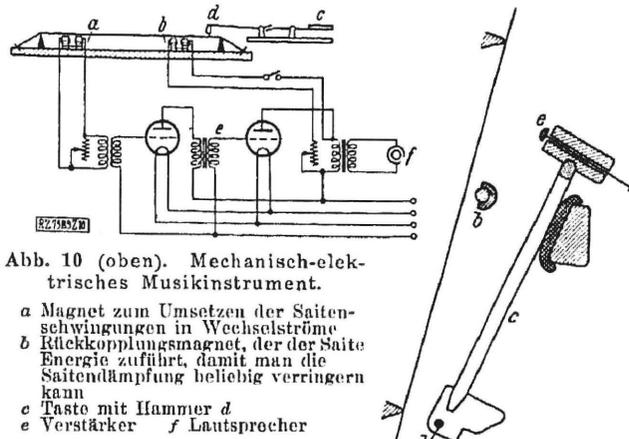


Abb. 10 (oben). Mechanisch-elektrisches Musikinstrument.

- a Magnet zum Umsetzen der Saitenschwingungen in Wechselströme
- b Reflektionsmagnet, der der Saite Energie zuführt, damit man die Saitendämpfung beliebig verringern kann
- c Taste mit Hammer d
- e Verstärker f Lautsprecher

Abb. 11 (rechts). Mikrohammer von *Nernst* und *Driescher*.

- a Saite b Leiste zur Anschlagbegrenzung, fängt die Bewegung des Haupthammers c auf d Drehzapfen
- e Mikrohammer, schlägt gegen die Saite a, wenn Hammer c gegen die Leiste b schlägt

dem Lautsprecher zugeführt, so ergibt sie den Charakter des geblasenen Tons, der ebenfalls langsam anschwingt. Ähnlich verläuft der Klang der Streichinstrumente. *Vierling* hat dadurch eine Lösung gefunden, auf einem Instrument mit Anschlag, dem Klavier, Streicherklänge, Bläserklänge sowie die verschiedenen Zwischenstufen von dem kurz angeschlagenen Ton des Xylophons bis zu den anderen Klängen, auf einem Instrument zu erzeugen.

Die weitere Entwicklung des elektrischen Musikinstrumentes

Aus den Ausführungen geht hervor, daß die ersten Versuche mit elektrischen Musikinstrumenten bereits sehr weit zurückliegen. Daß dieses Gebiet heute so stark im Vordergrund steht, ist dem Umstand zuzuschreiben, daß die Ausarbeitung des wirklich brauchbaren Geräts erst in den letzten Jahren erfolgt ist, wobei die Entwicklung aber keineswegs abgeschlossen ist. Die Arbeiten der letzten Zeit, die bemerkenswerte und brauchbare Lösungen versprechen, zeigen schon ungefähr die musikalischen Möglichkeiten, die durch die elektrischen Musikinstrumente gegeben sind. Um überhaupt seine Daseinsberechtigung zu beweisen, muß das elektrische Musikinstrument nicht nur dem Verlangen nach neuen Ausdrucksmöglichkeiten entgegenkommen, sondern es muß auch so allgemein spielbar und betriebsicher sein, wie es von jedem gewöhnlichen Musikinstrument verlangt wird. Damit wird auch die Entwicklungsrichtung für das elektrische Musikinstrument festgelegt. Es muß unter Beibehaltung der bisher aufgezeigten Möglichkeiten eine wesentliche Vereinfachung im technischen Aufbau erfahren, wozu die fortschreitende technische Entwicklung die Möglichkeit bietet.

[B 7989]