

SÜDWESTFUNK
Schriften-
reihe

RUNDFUNKGESCHICHTE 6

Hans Peter Haller

**Das Experimentalstudio
der Heinrich-Strobel-Stiftung
des Südwestfunks
Freiburg 1971-1989**

Die Erforschung der Elektronischen
Klangumformung und ihre Geschichte

Band 1

au-
dio-
-kom-
mu-
nika-
tion

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Haller, Hans Peter:

Das Experimentalstudio der Heinrich-Strobel-Stiftung des Südwestfunks Freiburg 1971–1989 : Die Erforschung der Elektronischen Klangumformung und ihre Geschichte / Hans Peter Haller. – Baden-Baden : Nomos Verl.-Ges.

(Südwestfunk-Schriftenreihe : Rundfunkgeschichte ; Bd. 6)

NE: Südwestfunk <Baden-Baden> : Südwestfunk-Schriftenreihe / Rundfunkgeschichte

1. – 1. Aufl. – 1995

ISBN 3-7890-3802-4

1. Auflage 1995

© Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden 1995. Printed in Germany. Alle Rechte, auch die des Nachdrucks von Auszügen, der photomechanischen Wiedergabe und der Übersetzung, vorbehalten.

Inhalt Band 1 und 2

Band 1

Prolog	9
Zur Technik der Elektronischen Klangumformung	22
Frequenzumsetzung <i>Teilton 1</i>	26
Klangselektion	55
Klangsteuerung	67
Anhang 1 / Tabellen – Frequenzumsetzung	103
Kleine Schwingungslehre <i>Teilton 6</i>	109
Schallwellen – Schallschwingungen	117
Der Klang	121
Schallerzeugung	126
Physiologische und psychoakustische Grundlagen des Gehörs	140
Anhang 2 / Frequenzliste	152
Anhang 3 / Sachregister und Bildnachweis	153

Band 2

Chronologie	9
Karlheinz Stockhausen	10
Cristóbal Halffter (1)	31
Hans Oesch - Experimentalstudio (1. Ausbaustufe)	46
Peter Schat	54
Pierre Boulez	55
Experimentalstudio (2. Ausbaustufe)	76
Cristóbal Halffter (2)	80
Kasimierz Serocki	97
Experimentalstudio (3. Ausbaustufe)	107
Luigi Nono	114
Dieter Schnebel	202
Weitere Aktivitäten des Experimentalstudios wie Free Jazz, Hörspiel, Video, Pädagogik, Kybernetik	218
Anhang 4 / Werkverzeichnis (bis 1990)	233
Anhang 5 / Namenregister und Bildnachweis	239

Klangbewegung:

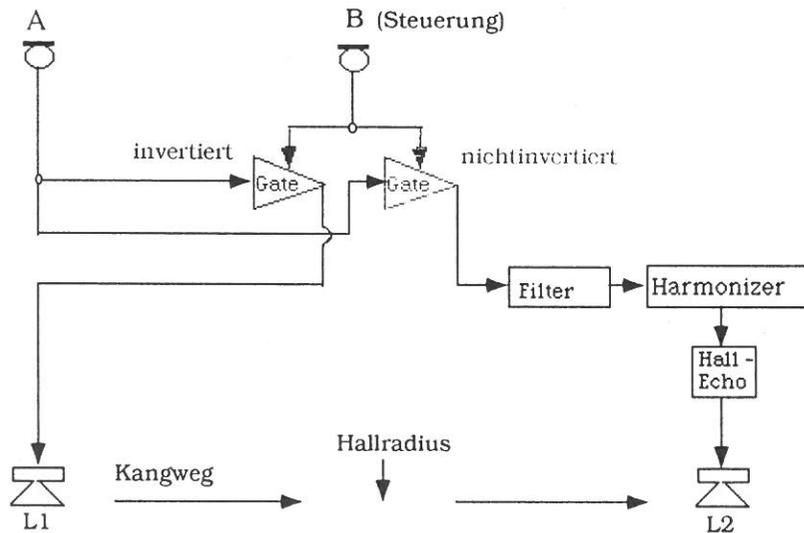


Abb. T30d

Für die Klangbewegung werden zwei Gates benötigt. Während das erste Gate, invertiert, ohne anliegende Steuerspannung ($B = 0 - ff$) geöffnet und Gate 2, nichtinvertiert, geschlossen ist, wechselt dieser Zustand mit ansteigender Spannung ($B = 0 - ff$). Der Ton von A wandert entsprechend der Dauer des Crescendos von B von L1 nach L2. Für diesen Klangweg sind lineare Kennlinien geeignet, sie regeln eine kontinuierliche Dynamikblende. Mit unterschiedlichen Charakteristiken der beiden Kennlinien kann ich die Kontinuität der Klangwanderung stören, zerbrechen. Eine Verzögerung des Signals A (Phasenverschiebung) vor der Gatesteuerung – ca. 20 - 40 Millisekunden – verbessert die Klangortsbestimmung, denn die Phase beeinflusst wesentlich die Klangortung. Alle Laufzeitunterschiede, mit denen akustische Signale auf das Ohr auftreten und zur Klangortbestimmung beitragen, sind Phasenverschiebungen. Es ist der gleiche, schon im Abschnitt über die Klangselektion genannte Effekt, der immer wieder auftreten wird und auch für die Klangbewegung, für die Realisation eines Klangweges, von großer Bedeutung ist. Dieses Beispiel zeigt, wie wichtig die frühzeitige Integration der klangerweiternden Funktion der Gatesteuerung in die kompositorische Arbeit ist. Es bleibt dem Erfindergeist

des Komponisten überlassen, die klangliche Vielfalt weiterer Gate-Kombinationen zu erschließen.

Durch die Einbeziehung eines Filters und Nachhallgerätes (Abb. T30d) kann die akustische Raumtiefe vergrößert werden (vergl. Klangselektion S. 51). Das klangliche Ergebnis wird deutlicher, wenn Tonquelle A sehr leise und nah am Mikrofon singt oder spielt. Wird zwischen Gate2 und L1 noch ein Harmonizer geschaltet und das Signal von A ca. 1/2 Ton tiefer transponiert, dann entsteht eine kleine, einseitige Simulation (Entfernen) eines Doppler-Effekts⁶².

In Abbildung T30d habe ich einen Harmonizer und das Wort Hallradius eingefügt. Bevor ich mit einem anderen Einsatzbereich des Gates (Raumklangverteiler) fortfahre, möchte ich kurz auf den Hallradius, den Doppler-Effekt und ein paar grundlegende Fragen zum Komplex Klangraum zu sprechen kommen. Für die Gestaltung eines Klangweges, eines Klang- und Zeitraumes haben diese eine nicht zu unterschätzende Bedeutung.

Generell muß an dieser Stelle eingefügt werden, daß die genannten und die noch folgenden Steuerfunktionen meist analog sind. Die Digitaltechnik ermöglicht schon heute, daß z.B. eine Mikrofon-Steuerspannung direkt in Daten umgewandelt und über MIDI weitergeleitet wird. Es gibt schon mechanische Musikinstrumente, die mit einem MIDI-Anschluß ausgestattet sind. Vorteil dieser digitalen Steuerung ist die direkte Ankoppelung an andere Digitalinstrumente, vor allem an den Computer. Es würde bei der Vielfalt der Geräte nur verwirren, alle Steuer- und Verarbeitungsmöglichkeiten eines akustischen Signals zu besprechen. Meine Ausführungen beziehen sich vor allem auf die Arbeit der letzten zwanzig Jahre im Experimentalstudio der Heinrich-Strobel-Stiftung des Südwestfunks in Freiburg und die dort geschaffenen Formen der Elektronischen Klangumformung.

T30 c+d zeigen kleine Klangwegschaltungen, gesteuert von einem Interpreten über zwei Gates. Doch je mehr ich mich mit dem Raumproblem in der Komposition beschäftige, um so kritischer wird die Realisation eines Klangraumes. Sehraum, Hörraum und Tastrraum:

Ein Vergleich dieser drei Räume macht deutlich, daß der Hörraum mit die schlechteste räumliche Übersicht vermittelt. Der Gehörsinn ermöglicht zwar, die Raumstruktur in bezug auf die Hörorgane und die Tiefengliederung bei Bewegung einer Schallquelle (Doppler-Effekt) zu ermitteln, Raumrelationen sind jedoch nur in geringem Maße wahrnehmbar, die Raumorientierung ist aus-

⁶² Christian Doppler, 1803-1853, österreichischer Physiker.

schließlich auf den eigenen Körper bezogen. Außerdem begrenzen Energieverlust und Ausbreitungsart der Schalldruckwellen den natürlichen Klangraum für die Musik.

Hermann von Helmholtz⁶³ unterscheidet in seiner Wahrnehmungstheorie zwei Schichten im Wahrnehmungsvorgang. Die erste elementare Schicht ist reizbedingt und *außerseelisch* verankert, in dem Sinne, daß einem Reizort stets der gleiche Ort, einer Reizart stets die gleiche Qualität und Intensität der zugehörigen Empfindung entspricht. Diese Schicht ist nicht bewußtseinsfähig, so daß die Vorgänge in ihr unerkannt bleiben. Die zweite, höhere Schicht ist bewußt, da sie die Sphäre des Urteils- und Denkvermögens ist. Wie ihre räumliche Struktur beschaffen ist, oder genauer: welche geometrische Gestalt der Raum aufweist, kann nur durch *Erfahrung* ermittelt werden. Die räumliche Wahrnehmung ist also die Eruierung der mit Inhalt erfüllten Raumstruktur. Primär ist dabei der Vorgang des *Lernens*. Die Sinnesempfindungen sind nämlich für das Bewußtsein nur Zeichen, deren Bedeutung zu erlernen dem Verstand – der höheren Schicht – überlassen ist.

Obwohl Helmholtz überwiegend von der Wahrnehmung des geometrischen Raumes spricht, so sind vor allem die Aussagen von der "Erfahrung" und vom "Erlernen" des Raumes auch für den akustischen Raum zutreffend.

Jens Blauert hat in seinem Buch "Räumliches Hören"⁶⁴ sehr ausführlich und differenziert über das Hören, den Ort des Hörereignisses im geometrischen Raum, geschrieben. Gerade zurückblendend auf die Aussage von Helmholtz ist es verständlich, wenn Blauert die Differenzierung der Hörwelt als abhängig von der individuellen Entwicklung des Menschen beschreibt. Die zunächst relativ diffus lokalisierten Hörereignisse grenzen sich räumlich immer schärfer ab, und auch die Zuordnung zur Gehörwelt und zu anderen Sinnesgebieten wird schärfer. In der Regel gilt, daß der Ort des Hörereignisses mit dem Ort einer schwingenden Schallquelle übereinstimmt. Es ist jedoch sehr problematisch zu glauben, daß Schallquellenort und Hörereignisort identisch sein müssen. Blauert sagt, daß, falls beide voneinander abweichen, es müßig ist zu fragen, welcher der beiden Orte falsch ist. Für den Entwurf eines Klangweges ist es wichtig zu wissen, wie groß die Ortsänderung einer Schallquelle, d.h. die Klangbewegung zwischen den Lautsprechern sein muß, damit eine Veränderung des Klangorts hörbar wird. Es ist nicht ausgeschlossen, daß aufgrund von Schallreflexionen mehrere Schallereignisse gleichzeitig auftreten. Außerdem kann die Ortung eines Hörereignisses von Person zu Person unterschiedlich sein. Jens Blauert stellt in einem anderen Abschnitt seines Buches fest, daß das Richtungshören in der Medianebene sich von dem der Horizontalebene

wesentlich unterscheidet. Durch die näherungsweise identische Beschallung der beiden Ohren ist bei ersterem die Auswertung interauraler Signalunterschiede kaum möglich. Auch diese Tatsache muß bei einer sehr hohen Platzierung der Lautsprecher im Konzertraum beachtet werden.

Es ist nicht Aufgabe dieser Dokumentation, einen vollständigen Bericht über die teils unterschiedlichen Auffassungen in der Raum- und Klangraumforschung zu geben. Einige Angaben sind jedoch als ergänzende Information und zum besseren Verständnis der Gestaltung musikalischer Klangräume, Klangwege notwendig. In diesem Sinne ist auch die Lektüre des genannten Buches von Jens Blauert jedem zu empfehlen, der sich mit Klangraum, Klangbewegung und Zeitraum beschäftigt.

Der Komponist orientiert sich am geometrischen Raum und versucht, in dessen erkennbaren Grenzen einen ebenfalls erkennbaren, d.h. erhörbaren Klangraum zu schaffen. Dieser Klangraum kann dem geometrischen Raum entsprechen, er muß es nicht. Der Komponist müßte eigentlich neidisch sein auf die Arbeitsweise des Architekten, der in der Planungsphase auf dem Papier einen Strich zieht, ost - westlich verlaufend, und Tage später wird er eine Mauer sehen, ost - westlich verlaufend wie projektiert. Der Komponist entwirft einen Klangweg, eine Klangbewegung, bezogen auf einen bestimmten geometrischen Raum. Er wird diesen Klangraum in der Praxis nie so hören, denn der Standort des Hörers, Schallreflexionen und Schallabsorption beeinflussen, wie zuvor genannt, den gedachten Klangweg. Aber gerade dieses Ungewisse, das alle, Komponisten, Interpreten und Techniker, in ihrer Arbeit von Konzertraum zu Konzertraum erfahren, wird immer Ansporn sein zu neuer Kreativität: nämlich neue Klang- und Zeiträume in der Musik zu erschließen, zu erhören. Dabei ist auch ein in Abbildung T30d eingezeichnetes Phänomen von großem Interesse: der "Hallradius".

Der physikalische Name für Raumklang ist *Raumschall*⁶⁵, d.h. ein Raum, in dem sich die Schallwellen bewegen. Wenn sich im Freien Schallwellen ausbreiten, so erreichen diese meist einen Hörort ohne Schallreflexionen. Der Akustiker spricht von einem *Direktschall*. Im Gegensatz hierzu haben Schallwellen in einem geschlossenen Raum bis zum Eintreffen an einem bestimmten Hörort bereits eine oder mehrere *Schallreflexionen* erfahren. Wichtig ist in diesem Fall das Verhältnis zwischen der Schallenergie des direkten Schalls und der Summe der reflektierten Schallenergie (Raumschallenergie). An einem definierten Ort eines normalen Innenraumes höre ich nahezu gleichzeitig den direkten und den reflektierten Klang einer Schallquelle. Der Lautstärkeunterschied der beiden akustischen Informationen wird als *Hallabstand* bezeichnet. Je mehr ich mich der Schallquelle nähere, um so besser höre ich

⁶³ Hermann von Helmholtz, Die Tatsachen in der Wahrnehmung, Berlin, 1879, in: Vorträge und Reden, 2 Bde, Braunschweig, 1884-1896.

⁶⁴ Jens Blauert, Räumliches Hören, Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 1974.

⁶⁵ Michael M. Rieländer, Realexikon der Akustik, Frankfurt a. M.: Verlag E. Bochinsky, 1982, S. 270.

den Direktschall, die Raumschallenergie wird im Verhältnis schwächer. Dieses Verhältnis ist logarithmisch. Nachstehend seine raumakustische Kenngröße:

$$10 \log \frac{S_{dir}}{S_{ref}}$$

S_{dir} und S_{ref} bedeuten Direktschall und reflektierter Schall.

Entfernt man sich von der Schallquelle, so wird im eben genannten Verhältnis die Raumschallenergie (diffuses oder statistisches Schallfeld) größer. Sind beide Schallpegel (direkt und diffus) gleich groß, wird dieser Zustand mit *Hallradius* (Abb. T31) bezeichnet. Der Hallradius steigt an, wenn das Raumvolumen größer wird; er verkleinert sich bei Verlängerung der Nachhallzeit. Außerdem ist der Hallradius von der Frequenz (Richtwirkung, Bündelungsgrad) der einzelnen reflektierten Schallwellen abhängig.

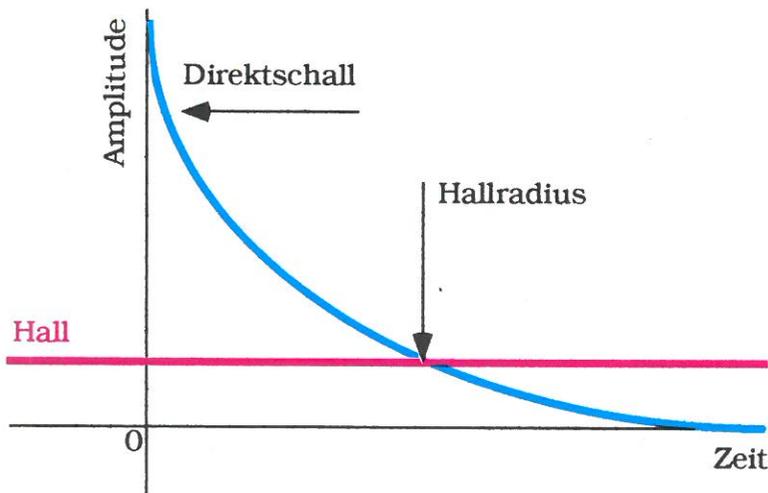


Abb. T31

Wenn zuvor ein nahezu gleichzeitiges Eintreffen des direkten und reflektierten Schalls genannt wurde, so heißt dies, daß Zeitunterschiede zwischen dem Eintreffen der Wellenfronten am Hörerort bis 50 Millisekunden quasi als Gleichzeitigkeit wahrgenommen werden. Wenn jedoch der Zeitunterschied größer als 50 ms ist, dann werden der Direktschall als Primärsignal und das reflektierte Signal als getrennte Hörereignisse empfunden. Es entsteht ein Echo⁶⁶.

⁶⁶ vgl. hierzu die zuvor genannte Phasenverschiebung innerhalb eines akustischen Signals.

In Abbildung T30e ist, wie schon zuvor angedeutet, zusätzlich ein Harmonizer zwischen Gate 2 und L2 eingezeichnet, um eine Simulation eines Doppler-Effekts zu realisieren. Der Doppler-Effekt läßt sich wie folgt beschreiben:

$$f_a = \frac{f_q}{1 - \frac{V_q}{V_s}}, \quad f_e = \frac{f_q}{1 + \frac{V_q}{V_s}}$$

Frequenzen:

f_a = der sich annähernden Schallquelle

f_e = der sich entfernenden Schallquelle

f_q = der Schallquelle

V_s = Schallgeschwindigkeit = 344m/Sek.

V_q = Geschwindigkeit der Schallquelle = km/h

Wenn man für

$f_q = 1000 \text{ Hz}$ ($< c^3$), $V_s = 344 \text{ m/Sek.}$ und $V_q = 15 \text{ km/h}$ (ca. 4,16 m/Sek.)

einsetzt, dann wird die Frequenz f_q der ankommenden Tonquelle um ca. 45 Hz erhöht, die der sich entfernenden Tonquelle um ca. 42 Hz tiefer.

Weitere Beispiele für die Realisation des Doppler-Effekts innerhalb einer Klangbewegung, eines Klangweges – zumindest seine Simulation – werden im folgenden Abschnitt aufgeführt.

Peter Lawo und ich entwickelten 1971 mit vier Gates, inzwischen auch als mit Gleichspannung gesteuerter Regler (Dynamikbereich ca. 70 dB) angeboten, vier Hüllkurvenoszillatoren mit unterschiedlichen Kurvenformen und einem elektronischen Kontrollsystem das erste Raumklangsteuergerät. Mit diesem Instrument waren Klangbewegungen mit variabler Geschwindigkeit möglich. Die Form der Bewegung war abhängig von der Position der vier dazugehörigen Lautsprecher. Dr. Otto Tomek, damaliger Leiter der Hauptabteilung Musik des Südwestfunks und erster Vorsitzender der Heinrich-Strobel-Stiftung, nannte dieses Gerät nach der ersten Inbetriebnahme HALAPHON⁶⁷, eine Verbindung der Namen HALlerLAWoPhon.

⁶⁷ vgl. Band 2, "Chronologie", Beginn des Experimentalstudios.

Halaphon: Elektronisches Raumklangsteuergerät

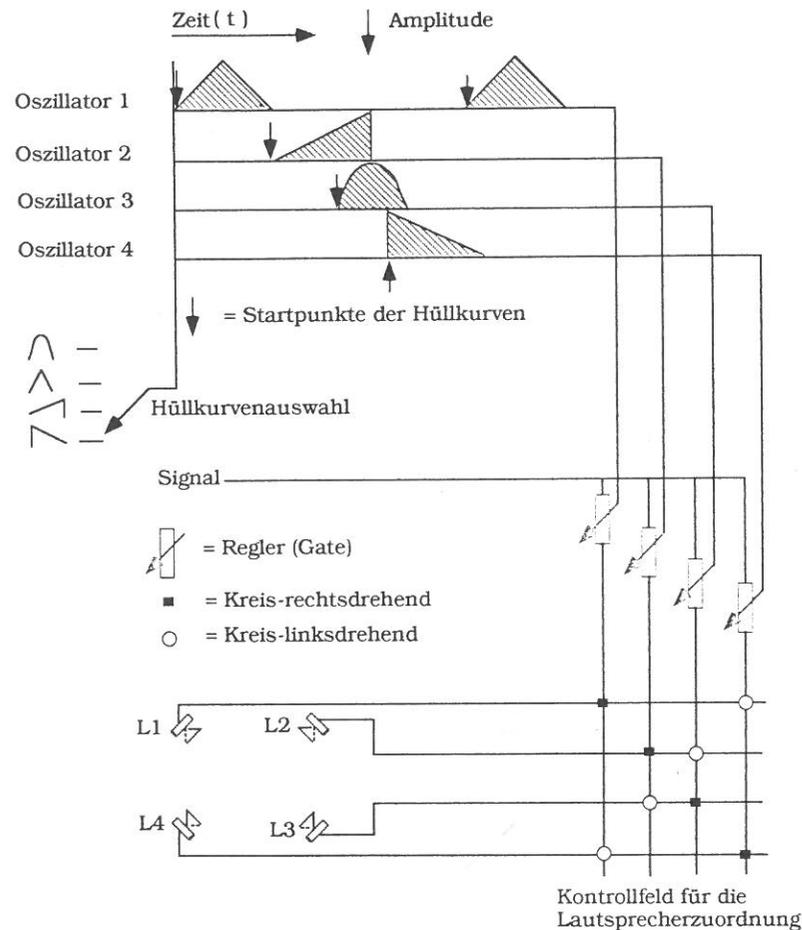


Abb. T32

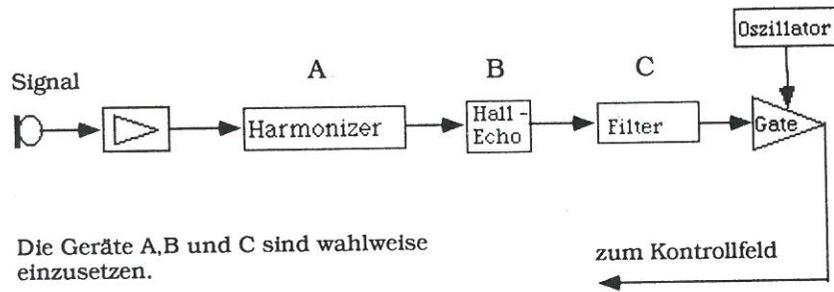
Abbildung T32 stellt das ursprüngliche Prinzipschaltbild dar, das bis heute, abgesehen von kleinen Modifikationen und unterschiedlichen elektronischen Bauteilen, noch Gültigkeit hat. Die vier Hüllkurvenoszillatoren kontrollieren die vier elektronischen Regler (Gates). Das nachfolgende Kontrollfeld übernimmt die Aufgabe der Auswahl einer bestimmten Bewegungsform. Würde man z.B. die Reihenfolge L1-L3-L2-L4 einstellen, dann verlief die Klangbewegung in Form einer Acht. In unserem ersten Gerät mußten die Oszillatoren zuerst einzeln gestartet werden, danach wiederholten sich die einzelnen Kurven-

zyklen in einer eingestellten Ablaufzeit (elektr. Zähler). Das Raumklangsteuergerät fand sehr bald das Interesse der Komponisten, so daß eine neue Version mit 8 Kanälen und einem digitalen Zähler (time code) entstand. Mit diesem Gerät realisierte das Experimentalstudio unter anderem im Januar 1973 in New York eine Uraufführung von Pierre Boulez⁶⁸: ...explosante fixe... für 8 Instrumente und Live-Elektronik. Nach wie vor beruhte die Klangwanderung auf einer dynamischen Steuerung (Abb. T32), doch hatte die zweite Version schon fünf kleine Verteilerfelder, auf denen mit Stiften (Pins) die Zuordnung der Lautsprecher zu den einzelnen Kanälen quasi programmiert und damit im Konzert mittels Umschaltung von Feld zu Feld verändert werden konnte.

Anläßlich eines Besuchs im Mai 1977 bei John Chowning, Stanford University S. Francisco, lernte ich die Klangwegsberechnungen für seine Komposition *Turenas* kennen. Ich war sehr beeindruckt und auch fasziniert, mit welcher Genauigkeit die Bewegungen nicht nur berechnet und programmiert, sondern auch gehört werden konnten. Natürlich saß man in einem kleinen Raum bei gleichem Abstand zu den 4 Lautsprechern auf dem Idealpunkt, was unter normalen Bedingungen im Konzertsaal nur für wenige Zuhörer möglich ist. Außerdem verwendet Chowning ausschließlich Computer-, d.h. synthetische Klangstrukturen. Ungeachtet dessen war dieser Besuch für mich und meine weitere Arbeit sehr wertvoll; ich lernte, daß für einen Klangweg die dynamische Steuerung allein nicht immer ausreichend ist. Schon mehrfach habe ich auf die klangliche Veränderung einer sich bewegenden Tonquelle hingewiesen und den Hallradius und Doppler-Effekt beschrieben. Beides sind physikalische Merkmale, die bei der Gestaltung einer Klangbewegung, eines Klangweges nicht ausgeklammert werden können. Der Doppler-Effekt wird in der Elektronischen Klangerweiterung in Echtzeit nur als klangliche Simulation "vereinfacht" realisierbar sein, Klangselektion und Nachhall (Klangtiefe) sind dagegen problemlos in den Raumklangverteiler zu integrieren. Filter, Hallgerät und Harmonizer werden zwischen dem Ausgang des Signalvorverstärkers und dem Regler (Abb. T33) eingefügt, so daß die Tonquelle schon vor der Dynamiksteuerung klanglich beeinflußt wird. Es gibt nur wenige Situationen, in denen die Position des Nachhallgeräts nach der dynamischen Regelung vorteilhafter ist, nämlich dann, wenn als Abschluß eines Klangwegs ein sehr langer Abklingeffekt des Nachhalls verlangt wird.

⁶⁸ Weitere Informationen über diese Uraufführung und Bild des Gerätes im Bd. 2, "Chronologie".

Auszug Halaphonschaltung (ein Kanal):



Die Geräte A,B und C sind wahlweise einzusetzen.

Abb. T33

Über den Hallradius wurde in Abbildung T31 geschrieben, er ist auch in das nächste Beispiel, Klangweg und Doppler-Effekt, mit einbezogen. Obwohl die Hüllkurven in Abbildung T34a nur schematisch dargestellt sind, ist der determinierte Klangweg deutlich zu erkennen. In diesem Zusammenhang sind die Dynamik- und Hallberechnungen von John Chowning von besonderem Interesse.

1. Entfernungsfaktor, wobei d=1 die Verbindungslinie der Lautsprecher bedeutet:

$$\frac{1}{d^2}$$

2. Hallanteilsfaktor:

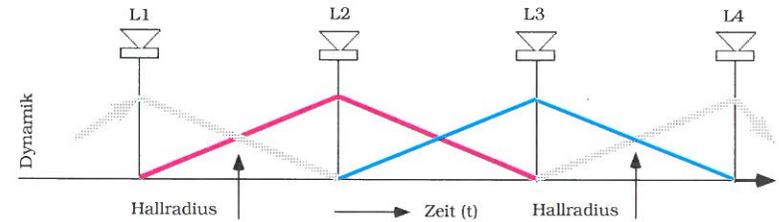
$$\frac{1}{\sqrt{d^2}} = \frac{1}{d}$$

Ist z.B. :

die Entfernung d = 1, dann ist	d= 1/1	= 1	(Faktor)
Hallanteil = 1/1		= 1	
die Entfernung d = 1/2, dann ist	d= 1/ 1/4	= 4	
Hallanteil = 1 1/2		= 2	
die Entfernung d = 2, dann ist	d= 1/4	= 0,25	(Faktor)
Hallanteil = 1/2		= 0,5	

Diese Formel sagt aus, daß bei kleiner werdender Entfernung (1/2) die Dynamik um den Faktor 4 zunimmt, der Hallanteil dagegen nur um den Faktor 2. Wird die Entfernung größer (x 2), so ist die Abnahme des Nachhalls weniger als die der Dynamik, der Klang wird diffuser.

Relative Hüllkurven für eine Doppler-Effekt-Simulation:



- = Filter und Hall
- = Harmonizer 1, ca. 1/4 Ton höher
- = Harmonizer 2 ca. 1/4 Ton tiefer
- rote Säulen = Dynamik des Direktschalls
- schwarze Säulen = Dynamik des Nachhalls

Abb. T34a

Aus Abbildung T34b und den beiden Formeln ist das Verhalten des Nachhalls zum Direktschall sehr gut zu ersehen:

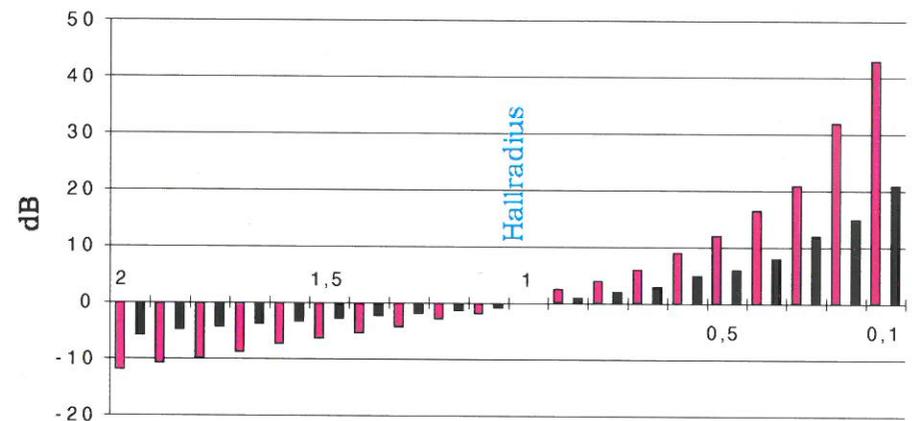


Abb. T34b

Der Hallradius fällt mit der Lautsprecherbasis (Faktor 1) zusammen. Das Diagramm zeigt einen Klangweg, der sich vom Hörer nach außen entfernt. Die

Zeitfunktion ist absichtlich vernachlässigt, da die Größe von Faktor 1 relativ und die Raumakustik, das Raumvolumen in diesem Beispiel unbekannt sind. Das Ohr kann nur mangelhaft – wie schon an anderer Stelle gesagt – die Entfernung einer Schallquelle erfassen (vergleiche Richtungshören – Laufzeitdifferenz), um so wichtiger sind die dynamische und klangliche Veränderung eines ankommenden oder sich entfernenden Klanges. Die einzelnen Werte können daher für musikalische Klangbewegungen eher erhöht als erniedrigt werden. Die Gesamtdynamik in T34b umfaßt einen Bereich von ca. 55 dB, ein Minimum-Regelbereich, über den alle elektronischen Geräte zur Klangraumgestaltung verfügen sollten.

Ergänzungsschaltung für Klangweg mit Hallradius und Doppler-Effekt:

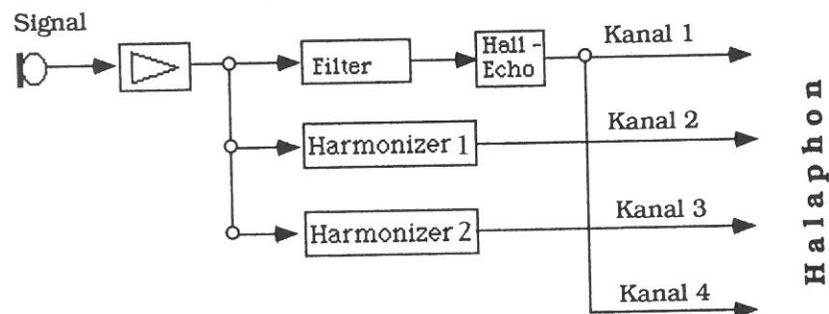


Abb. T35

Die Tonquelle T34a kommt aus dem diffusen Raum, Lautsprecher 1, Filter und Hall. Der auf Lautsprecher 2 ankommende Klang wird im Harmonizer 1 um ca. 1/4 Ton erhöht, während die Tonhöhe der Klangquelle im weiteren Verlauf in Richtung Lautsprecher 3 tiefer wird (Harmonizer 2), um dann in den diffusen Raum – Lautsprecher 4 – zurückzukehren. Die eingezeichneten Blenden am Anfang und Ende des Klangwegs L1 - L4 sind von einem Gesamtbewegungsablauf abhängig, innerhalb dessen dieser spezielle Klangweg integriert ist. Sollte dieser kurze Klangweg jedoch einen abgeschlossenen Vorgang bilden, dann müßten die Blendenzeiten (vor und nach der eigentlichen Bewegung) in eine Gesamtzeit einbezogen werden. Die genauen Werte für Filter und Nachhall sollten empirisch von Raum zu Raum neu erprobt, erhöht und entsprechend modifiziert werden. Sie sind von der jeweiligen Raumakustik und Saalgröße abhängig. Die Tonhöhenunterschiede (Harmonizer) können aus der zuvor genannten Formel des Doppler-Effekts errechnet werden. Für eine angenomme-

ne Geschwindigkeit der Schallquelle von ca. 15 km/h und eine Saallänge von ca. 12 m würde die Zeit einer Hüllkurve = 2 Sekunden und damit die Zeitdauer von L1 nach L4 3 Sekunden betragen. Hinzu kämen gegebenenfalls die Zeiten für das zuvor genannte Auf- und Abblenden. Die Umrechnung km/h in m/sek ist:

$$\text{kmh} * 1000 / 3600 = \text{m/sek.}$$

Ich muß nochmals betonen, daß ich mir absolut darüber im klaren bin, daß diese Simulation unzulänglich ist, denn zu jedem Hörort im Konzertsaal haben die Lautsprecherpositionen andere Bezugspunkte. Trotzdem kann diese Simulation gehörpsychologisch die Wahrnehmungsschärfe einer Klangbewegungsrichtung vergrößern und dies letztlich aufgrund der entstehenden Phasenverschiebungen zwischen Lautsprecher- und Originalklang. Gespräche mit Jens Blauert haben mir sehr geholfen und mich angeregt, über die Frage der *Phasenlage* in der Raumorientierung immer wieder nachzudenken.

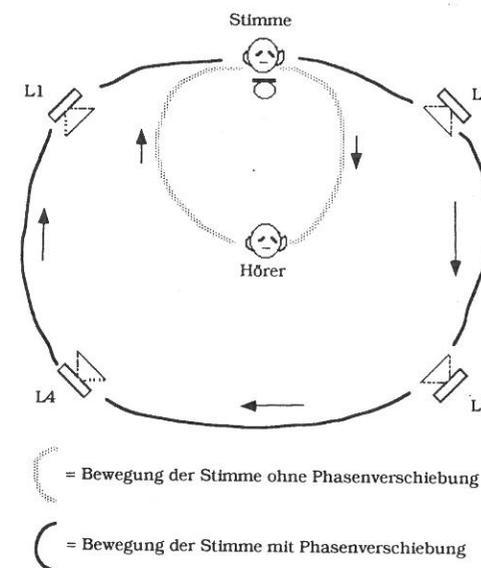


Abb. T36

Die einfachste Art, ein komplexes Signal in seiner Phase zu verschieben, ist seine Verzögerung im Bereich zwischen 10 und 100 Millisekunden. Bei gleicher Phase von Original- und Lautsprecherklang wäre die Ortung der Klangbewegung sehr schlecht (siehe Abbildung T36), da die Laufzeitunterschiede zwischen den beiden akustischen Informationen und nicht der gesteuerte Klangweg den Klangort bestimmen. Ein alter und bekannter Hörtest der Stereo-

phonie: für den dynamischen Abgleich der Lautsprecher wird der Verstärker auf "stereo" geschaltet. Ein Monosignal muß bei gleicher Verstärkereinstellung in der Mitte der beiden Lautsprecher wahrgenommen werden. Wird einer der beiden Kanäle um eine kleine, zuvor genannte Zeit verzögert oder die Phase auf eine andere Weise verschoben, dann muß das Signal einzeln von den Lautsprechern gehört werden. Die Klangbasis verbreitert sich. Die akustischen Merkmale eines Klangwegs – vorausgesetzt in Echtzeit, d.h. mit örtlich statischer Klangquelle (Musiker) – sind dem Stereobeispiel gleich. Wie nun letztlich die Phasenveränderung zu realisieren ist, ob z.B. mit Verzögerung, Filter, Nachhall oder Transposition des Signals, bleibt dem Komponisten und seinem musikalischen Konzept überlassen. Außerdem ist die Lokalisierungsschärfe einer Klangbewegung auch von der Art (Klangfarbe) des zu bewegendes Signals abhängig. So ist der Bewegungsverlauf einer stehenden Sinusschwingung weit schwieriger zu erkennen als der eines akzentuierten Klanges. John Chowning hat aus diesem Grund in seiner Klangraumkomposition *Turenas* für die zu bewegendes Signale meist sehr rhythmische Klangstrukturen eingesetzt. Ebenfalls kann man feststellen, daß die Bewegung von Sprache besser zu orten ist als die eines statischen Klanges. 1968 hat M. B. Gardner⁶⁹ im freien Schallfeld (reflexionsarmer Raum) bei Sprache eine Lokalisierungsunschärfe von nur 0,9 Grad gemessen. Bei der akustischen Erprobung eines Konzertraumes ist es daher empfehlenswert, für Klangwegsexperimente entweder *Rauschen* oder einen *Wobbelton* – Tonhöhe einer Sinusschwingung schwankt periodisch um den Mittelwert ihrer Frequenz – zu verwenden. Für die Programmierung der Blendvorgänge (Hüllkurvenübergänge) ist es vielleicht interessant zu wissen, daß sich normalerweise zwei phasengleiche (kohärente) Signale (Amplitude) – räumliche Information aus einem Lautsprecher – um das Doppelte addieren: $6 \text{ dB} + 6 \text{ dB} = 12 \text{ dB}$. Nichtkohärente Signale addieren sich nur um 3 dB, dies bedeutet: $6 \text{ dB} + 6 \text{ dB} = 9 \text{ dB}$. Bei mehreren Lautsprechern im Raum, z.B. bei einer Klangbewegung, ist die Addition zusätzlich von Faktoren, wie Nachhall, Entfernung, Reflexionen und Klangspektrum abhängig. Der durchschnittliche Erfahrungswert liegt in diesem Fall bei 3 dB, d.h. $6 \text{ dB} + 6 \text{ dB} = 9 \text{ dB}$, eine Dynamikzunahme ca. um die Hälfte. Es müssen jedoch auch neue Erfahrungswerte, von Konzertsaal zu Konzertsaal modifiziert, weiterhelfen, eine dynamisch ausgeglichene Klangbewegung für die genannten Blendvorgänge zu erzielen.

Eine dritte Generation des Halaphons wurde entwickelt. Dieses Instrument war in erster Linie auf mehr Kanäle (16 Eingangs- und 16 Ausgangskanäle), eine verfeinerte Zeitsteuerung und erweiterte Programmiermöglichkeiten (in-

⁶⁹ M.B. Gardner, "Lateral localization of 0 or near 0 degree's oriented speech signals in anechoic space", J. acoust. Soc. Amer. 1968, 44, 797-803.

terner Mikroprozessor oder externer Zentralcomputer) hin konzipiert. Es zeigte sich sehr bald, daß viele Erneuerungen nicht effektiv waren, so z.B. 16 getrennte Eingangskanäle. Es ist für das menschliche Ohr unmöglich, die Klangbewegung von 16 unterschiedlichen komplexen Klanginformationen wahrzunehmen. Die eigentlichen Vorzüge dieser Neukonstruktion waren:

1. Freie Gestaltung der digitalen Hüllkurven, über ein Summagraphics⁷⁰ direkt zeichnerisch einzugeben. Die digitalen Hüllkurven werden in eine Steuergleichspannung umgewandelt (hybrides System).
2. Die Gleichspannungen der Hüllkurven können extern, z.B. zur Kontrolle eines analogen Synthesizers, verwendet werden.
3. Pegelanzeige (Dynamik) der einzelnen Kanäle mittels Leuchtdioden.
4. Externer Triggerstart, entweder manuell oder durch ein akustisches Signal (Mikrofon).
5. Umwandlung eines analogen Signals in Zeitimpulse (Time code) = U/f , d.h. mit zunehmender Lautstärke des Signals wird der interne digitale Zähler schneller oder umgekehrt langsamer.
6. Alle Funktionen, wie digitaler Zähler, Hüllkurvenauswahl, Kanalzuordnung usw. sind digital gespeichert und können zu einem späteren Zeitpunkt intern oder extern (Zentralcomputer) abgerufen werden.

Die schnelle Entwicklung auf dem digitalen Sektor und die mit diesem Raumklangsteuergerät gewonnenen praktischen Erfahrungen ermöglichten dann den Bau einer vierten Halaphon-Generation.

Das neue Instrument (Abb. T37) ist mit einem großen Bildschirm ausgestattet, auf dem die Dynamik der einzelnen 16 Kanäle (auf der Abbildung zu sehen), alle Zeit- und Ablauffunktionen, Kontrollfeld für die Lautsprecherzuordnung und die Hüllkurvenformen dargestellt werden können. Die Bildumschaltung sowie allgemeine Eingabe- und Abrufbefehle erfolgen über den sechzehner Tastenblock. Rechts neben diesem Block befinden sich die numerischen Tasten, daneben vier Tasten für die Bewegung des Bildschirmzeigers (Cursor).

⁷⁰ "Summagraphics" = digitales Zeichentablett zum Anschluß an einen Computer.

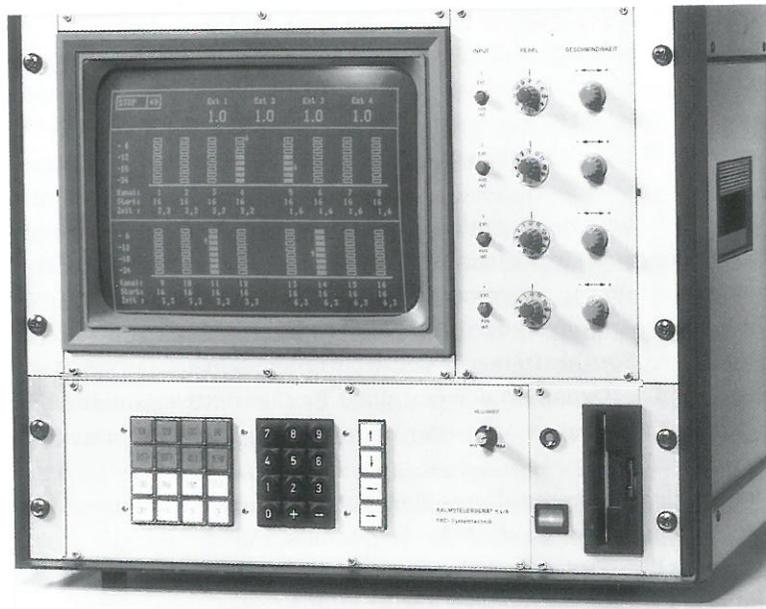


Abb. T37

Die Potentiometer rechts neben dem Bildschirm dienen der genauen Einstellung der externen Triggerspannung (threshold). Eine diesen Bedienungselementen angeglichene Betriebssoftware ermöglicht auch dem *Nichtinformatiker* sehr schnell den Umgang mit diesem Gerät. Wichtig ist – wie immer – die Kenntnis der zuvor beschriebenen Parameter für eine akustische Klangbewegung. In diesem Halaphon können 50 Kombinationen intern, weitere in einem Zentralcomputer abgespeichert werden. Die Eingabe von nicht in der Betriebssoftware vorbereiteten Hüllkurvenformen erfordert eine kleine Softwaremodifikation. Sicherlich wird in der nächsten Generation diese Eingabe direkt von der Bedienungsplattform möglich sein. Mit diesem Halaphon ist eine universelle Steuerung einer akustischen Information im Raum möglich.

Eingabefunktionen:

1. Form und Zeit der Hüllkurven.
2. Zuordnung einer Hüllkurve zu einem der 16 Kanäle.
3. Startzeit der einzelnen Hüllkurven, Festlegung des Ablaufs der Hüllkurven: punktförmig oder überlappend. Die Blendzeiten zwischen Hüllkurven müssen z.T. von der Grundzeit (1.) der Hüllkurve abgezogen werden.
4. Einstellung der Zeitfunktion für den Zähler (Time code).

5. Interne oder externe Kontrolle der Geschwindigkeit des Zählers.
6. Auslösung der Startfunktion: automatischer Programmablauf, manuell oder Trigger.
7. Zuordnung der einzelnen Kanäle zu den Lautsprechern (Bewegungsform).

Im folgenden das praktische Beispiel eines Klangwegentwurfs:

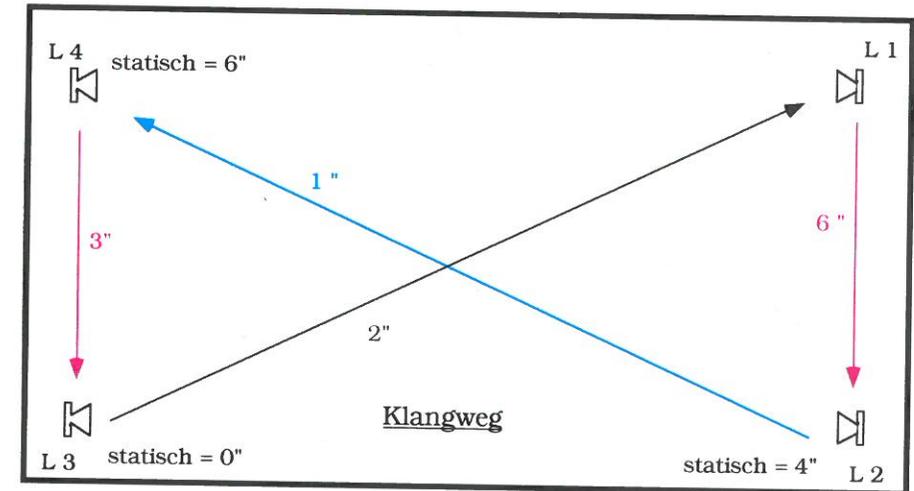


Abb. T38

Der Klangweg beginnt bei Lautsprecher eins, von diesem wandert der Klang in 6 Sek. nach Lautsprecher zwei. In Lautsprecher zwei bleibt das Signal 4 Sek. statisch, danach wandert es in 1 Sek. nach Lautsprecher drei, wo es wieder 6 Sek. statisch stehen bleibt, um dann über Lautsprecher vier – in 3 Sek. – nach Lautsprecher eins in 2 Sek. zurückzukehren. Abbildung T39 zeigt den Entwurf der einzelnen Hüllkurven, ihren Startpunkt und ihre Zeitdauer. Die Form und die Zeit der akustischen Überlappung sind wieder mehr sinnbildlich dargestellt, sie müssen praktisch erprobt und dann von Konzertsaal zu Konzertsaal modifiziert werden. Die Zeitangaben sind relativ, d.h. indem die Zeitfunktion des Zählers langsamer oder schneller programmiert wird, kann die Zeit des Gesamt Ablaufs verändert werden. Dieser Zeitregelvorgang des Zählers kann auch extern durch die Dynamik z.B. eines Instrumentes kontrolliert werden: Spielt ein Musiker leise, so ist die Klangbewegung langsam, gegebenenfalls bis zum Stillstand. Spielt der Musiker lauter, dann steigert sich entsprechend seiner Dynamik das Tempo der Klangbewegung. Diese externe Regelmöglichkeit des elektronischen Taktgebers (Zähler) kann sehr effektiv gestaltet werden.

verbindet sie doch einen *technischen* Prozeß mit einer *musikalischen* Aussage zu einer Einheit.

Klangweg - Hüllkurven

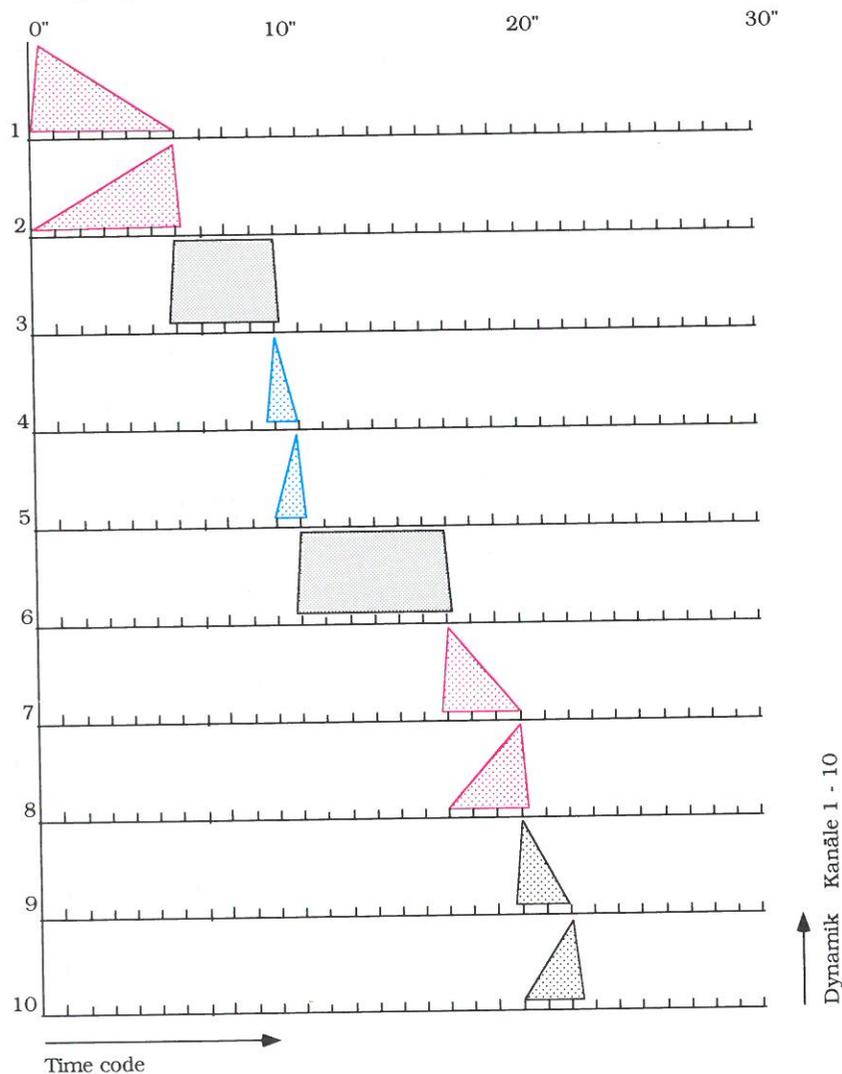


Abb. T39

Dieser Klangweg basiert auf einer reinen Dynamiksteuerung. Zusätzliche akustische Rauntiefen können, wie zuvor beschrieben, auch in diese Klangbewegung integriert werden. Es wäre denkbar, daß die Kanäle 1 und 10 durch Vor-

schalten eines Filters und Hallgeräts diffuser werden und damit akustisch entfernt klingen.

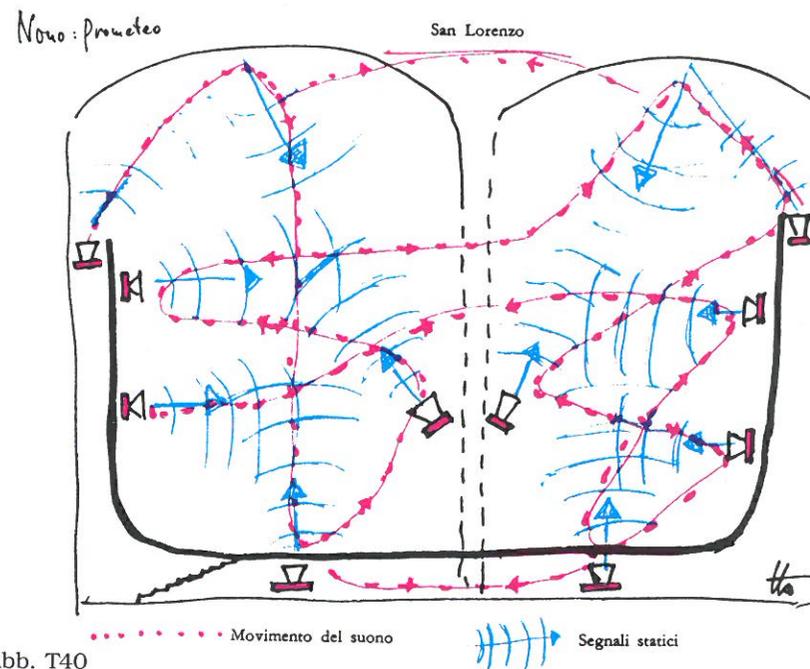


Abb. T40

Erster mit dem Komponisten Luigi Nono erarbeiteter Entwurf für Klangwege in S. Lorenzo, Venezia. Nach diesem Entwurf wurden während der Proben zu *Prometeo* von Nono akustische Experimente durchgeführt und danach die Klangbewegungen für das Halaphon festgelegt und programmiert.

Sicherlich werden noch andere Generationen des Halaphons entwickelt. Neue elektronische Bausteine, voran die sich schnell verändernde Digitaltechnik, können dieses Instrument verbessern, noch vielseitiger einsetzbar machen. Die Steuerfunktionen für eine Klangbewegung, Abb. T32, bleiben jedoch unverändert, gleichwie die Parameter der musikalischen Akustik und die eines Klangraumes.

Nach wie vor wird die einfache Klangbewegung mit vier Dynamikreglern und vier Lautsprecherkombinationen auch manuell realisierbar bleiben, was sich ändert, ist die Hardware, die mechanisch-elektronischen Bestandteile eines Gerätes. Eine technische Weiterentwicklung sollte jedoch die *einfache Bedienung* auch für Nichttechniker, für Nichtinformatiker beibehalten; denn Grundlage für einen musikalischen Klangraum, eine Klangbewegung sind letztlich

Aussagekraft und Ohren des Musikers, des Komponisten und nicht technische Raffinessen.

**Musik ohne Klangraum ist undenkbar,
der Komponist komponiert im Raum, für den Raum.
Der Klangraum muß wieder mit zur formalen Funktion
einer Komposition werden.**

Was heißt Hall?

Es gibt mehrere, teils sehr unterschiedliche Hallbegriffe:

1. Halligkeit, bedeutet neben dem Direktschall vorhandene reflektierte Schallwellen, die jedoch nicht als Wiederholung eines akustischen Signals (Direktschall) empfunden werden.
Beispiel: ein großer Saal, in dem der Schallquellenort sehr weit von einem Hörer entfernt ist. Die Sprachverständlichkeit ist schlecht, ebenfalls die Durchsichtigkeit eines differenzierten Klangbildes (z.B. polyphone Musik). Beides wird mit einer Annäherung des Hörers an die Schallquelle besser, unter Umständen klingt der Raum nahe der Schallquelle trocken.
2. Hallradius, wurde schon im vorangegangenen beschrieben.
(Abbildung T31)
3. Raumschall, Gegensatz zum Direktschall. Summe der Schallwellen in einem geschlossenen Raum, die bis zum Eintreffen an einem Hörort mehrfach reflektiert wurden (siehe Seite 55).
4. Nachhall, wiederholte Reflexionen der Schallwellen in einem geschlossenen Raum, die nach dem Abbrechen eines akustischen Signals allmählich und von mehreren Faktoren abhängig ausklingen, so z.B. von der Beschaffenheit der umgebenden Wandoberflächen. Im Gegensatz zum Direktschall entsteht ein statistisches (diffuses) Schallfeld. Über Nachhallformen, Nachhallkurven und Nachhalldauer vergleiche Reallexikon der Akustik, Seite 233 ff., wo Interessierte noch weitere Literatur finden.
5. Echo, Bezeichnung für Wiederhall, das sind Schallreflexionen, die nicht als ein kontinuierlich-abklingender akustischer Vorgang gehört werden, sondern als räumlich und zeitlich getrennte Hörereignisse.

Das Echo tritt normalerweise im Freien auf als einmalige Schallreflexion, z.B. an großen Gebäuden, Bergen etc..

Innerhalb der Elektronischen Klangumformung sind für einen kompositorischen Einsatz nur Nachhall, Hallradius und Echo interessant. Wie schon bekannt, begrenzen Energieverlust und Ausbreitungsart der Schallwellen den natürlichen Raumklang für die Musik. Die Elektronische Klangumformung ermöglicht nun die gezielte Schaffung von neuen Klangräumen, von neuen musikalischen Formen. Der Nachhall: mehrere Reflexionen eines Schallereignisses im Raum variieren normalerweise in einer Zeitdauer zwischen 0,5 und 10 Sekunden. Räumlich betrachtet reicht dies vom reflexionsarmen Produktionsstudio bis zu großen Kirchenräumen, die aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit ihrer Wände die Reflexionen begünstigen. Heute stehen digitale Hallgeräte zur Verfügung, deren Funktionen mit einem normalen Nachhall nicht mehr vergleichbar sind. Die Digitaltechnik ermöglicht Nachhallzeiten, die mit natürlichen Schallreflexionen nichts zu tun haben: Zeiten zwischen 100 Millisekunden und 200 Sekunden und ein Raumvolumen bis zu einer Million Kubikmeter, wobei das Einsetzen der Reflexionen und ihre zeitlichen und spektralen Abklingfunktionen definiert werden können. Die Bezeichnung "Nachhall" ist nur noch bedingt gültig, es handelt sich mehr um neue künstliche "Klangräume". Sie sind als solche in die Elektronische Klangumformung einzuordnen. Es geht nicht mehr um die "Verhallung" von Klängen, wie aus der Produktionstechnik, vor allem aus dem Bereich der U-Musik bekannt, es geht um die Schaffung neuer Klangräume. Auf diesem Gedanken basierend werden die langen Nachhalldauern wieder sinnvoll. Natürlich sollten dafür auch neue kompositorische Formen erarbeitet werden.

Luigi Nono⁷¹ entwickelte für seinen Prometeo den "CORO LONTANISSIMO", Chorklang aus sehr großer Entfernung. Das Werk Nonos beginnt mit einem gesungenen Akkord des Chores (Frauenchor), der langsam aus dem Raum in einen neuen diffusen Raum wandert (zwischen 8 bis 15 Sekunden). Der Chor singt fünffaches Pianissimo, in einer normalen Raumakustik ist selbst in einem noch so halligen Konzertsaal aufgrund der geringen Schallenergie ein Nachhall dieser Zeitdauer nicht möglich. Zwei Klanggestalten, durch deren Mischung schon am Anfang einer großen Komposition die geometrischen Raumgrenzen verschwommen werden.

⁷¹ vgl. Band 2, "Chronologie", Luigi Nono.

Luigi Nono: Prometeo
 Beginn Prologo

CORO ALTI

LONTANISSIMO

OPPOSTI - COLLETA

BATTUTA 7 INCLUSA

CORO LONTANISSIMO

Abb. T41

Nono verwendete seine neue musikalische Form auch im 2. Satz seines Prometeo, Isola una (Abb. T42). Für diesen Teil hat er die Nachhallzeit für CORO LONTANISSIMO auf 20 Sekunden verlängert, denn die Dynamik ist dreifaches *Pianissimo*. Auch in diesem Fall würde man ohne die Live-Elektronik nahezu keinen Nachhall hören, da die Intensität des Originalklanges zu klein ist. CORO LONTANISSIMO ist somit eine neue musikalische Form, die nur mit Hilfe der Elektronischen Klangumformung realisiert werden kann.

Luigi Nono: Prometeo
 Isola 1

(735) 4/4

CORO LONTANISSIMO

(con strumenti elettronici)

ppp

NTE

Abb. T42

Der Komponist schafft kraft seiner *künstlerischen* Aussage für seine Komposition einen eigenen *künstlichen* Klangraum, wobei wichtig ist, daß dieser neue Klangraum für jede neue Komposition, für jedes Konzert aufgrund der unterschiedlichen akustischen Bedingungen neu erforscht, neu bestimmt werden muß. Komponisten und Interpreten müssen sich immer wieder in den Klangraum einhören, hineinhören, den Raum verstehen lernen.

Die geometrischen Grenzen eines Raumes sind gegeben. Der Komponist versucht, in diesen Grenzen einen erhörbaren Klangraum zu schaffen, der diesen Grenzen entsprechen kann – er muß es nicht. Hierzu ein Vergleich mit zwei Räumen und ihr Einwirken auf musikalische Formen:

1. Die Emporen von S. Marco in Venedig, ein Raum, für den aufgrund seiner Architektur mehrstimmige Musik komponiert wurde.
2. Der Musikpavillon, die Konzertbühne mit der ihnen eigenen komplexen Schallabstrahlung in einer nahezu gebündelten Richtung. In diesen Räumen werden in erster Linie die klassischen Musikformen wie Solostücke bis hin zum großen Sinfonieorchester aufgeführt, Kompositionen, die an fest zugeordnete räumliche Positionen gebunden sind.

Die heutigen Konzerträume haben meist eine geringe klangliche Raumdiefe, ein Trend, der zweifellos auf die Studioteknik der Medien, Rundfunk und Schallplatte zurückzuführen ist. Diese Medien verlangen ein Hören "ohne Sehraum". Alle Instrumente oder Stimmen müssen präsent mit nahezu gleicher Intensität zu hören sein. Sollte dieses Klangverhältnis nicht stimmen, wird mit baulichen Maßnahmen, Schallreflektoren, nachgeholfen. Man betrachte die neuen Konzertsäle wie z.B. den Kammersaal der Berliner Philharmonie oder den großen Konzertsaal in Gasteig (München), um nur zwei zu nennen, wo Schwärme von Reflektoren drohend über den Interpreten und Zuhörern schweben, den Blick auf den eigentlichen Raum störend, ja teilweise hindernd. Damit wird ein *künstlicher* Raum für die traditionelle musikalische Aufführungspraxis geschaffen. Eine natürliche akustische Tiefenwirkung, wie sie für die neue und auch für die traditionelle Musik wünschenswert erscheint, wird durch diese *Direktbeschallung* meist nivelliert. Die Arbeit mit dem digitalen Nachhall, dem Hallradius und auch dem Echo versucht mittels der Elektronischen Klangerweiterung, dem Komponisten den Klangraum in seiner großen Vielfalt und Tiefe als kompositorisches Material wiederzugeben. Ein Paradoxon unserer heutigen Raumakustik.

Dieser kleine Exkurs in die heutige Aufführungspraxis soll verdeutlichen, wie wichtig es ist, gerade den digitalen Nachhall, auch in Verbindung mit Klang-

transposition und -selektion, sinnvoll in den kompositorischen Prozeß zu integrieren, d.h. neue künstliche Klangräume zu schaffen.

Zum Schluß dieses Abschnitts sei noch kurz das Echo erwähnt, das vor allem als "Iteration" Verwendung findet: ein einmaliges Echo von meist relativ kurzer Dauer (0,2 - 1,5 Sekunden) wird auf den Eingang des Echogerätes zurückgekoppelt (Feedback), wobei die dynamische Größe der Rückkopplung den Abklinggrad der Tonwiederholung bestimmt. Mit digitalen Geräten kann annähernd eine Endlositeration produziert werden. Analog wird diese Iteration mit einem Magnetofon realisiert, indem man das Wiedergabesignal auf den Aufnahmekopf zurückkoppelt (Vorsicht, es kommt schnell zu einer Übersteuerung). Die Zeitdauer des Iterations-Echos kann in diesem Fall mit der Geschwindigkeit des Magnetofons verändert werden (am besten 9,5/19/38cm pro Sekunde).

Die Zeitverschiebung, Zeitversetzung eines akustischen Signals hat in der Geschichte der Komposition schon immer einen wichtigen Stellenwert eingenommen und führte zu eigenen musikalischen Formen, wie z.B. dem Kanon, dem Fugato oder die Echowirkung in der Instrumentalmusik des 17. und 18. Jahrhunderts. Echo – Raumdiefe – Raumwechsel. Auch heute entstehen durch diese Zeitverschiebung neue kompositorische Formen. Innerhalb der Elektronischen Klangumformung wurde die Verzögerung eines Signals zuerst mit magnetischen Bandaufzeichnungsgeräten realisiert: zwei Magnetofone, eines zur Aufnahme und ein zweites für die Wiedergabe. Der schwache Punkt dieser Methode waren zwei getrennte, asynchrone Antriebsaggregate⁷², die bei subtilen Klängen *Jauleffekte* produzierten (Abbildung T43).

Analoge Verzögerung:

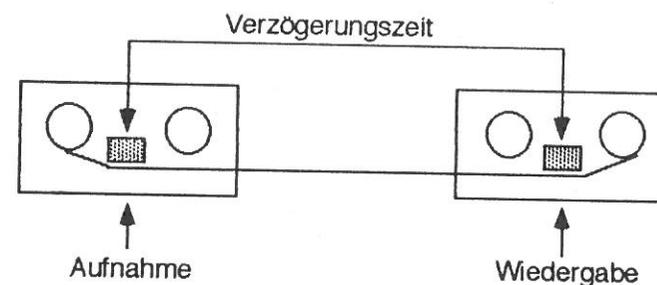


Abb. T43

⁷² vgl. Band 2, "Chronologie". Cr. Halffter, NOCHE PASIVA DEL SENTIDO.

Heute stehen digitale Verzögerungsgeräte zur Verfügung, die im Gegensatz zu den erstgenannten eine bessere Tonqualität und größere Zeitvariationen besitzen. Außerdem können diese digitalen Verzögerungsgeräte vorprogrammiert werden, eine bemerkenswerte Spielhilfe im Konzert. Der Computer macht die Geräte, wie schon bei Instrumenten zuvor, *musikalischer*, so paradox dies klingt. Dank des schnellen Zugriffs zu den gewünschten Zeitparametern ist eine absolute Einordnung in einen vorgezeichneten Ablauf einer Live-Interpretation gegeben.

Es gibt natürlich auch bei diesen digitalen Geräten unterschiedliche Modelle. Im Freiburger Experimentalstudio werden Verzögerungseinheiten eingesetzt, die Zeitverschiebungen zwischen 0,02 ms und 21 Sekunden pro Kanal ermöglichen; Zeiten, die aufgrund ihrer großen Dauer mit einer einfachen kanonischen Wiederholung nichts mehr zu tun haben, die neue Zeiträume erschließen.

Zweikanalige Verzögerung:

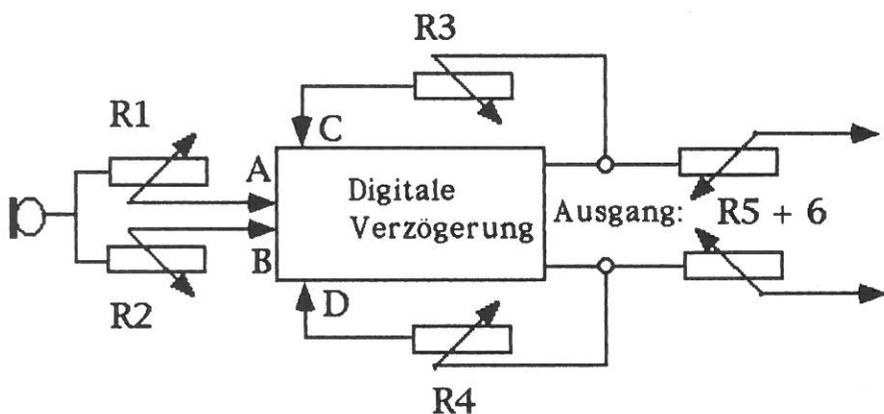


Abb. T44

In Abbildung T44 ist das Schaltbild für eine 2-kanalige Verzögerung ohne Zeitangaben dargestellt. Um eine sehr musikalische Regelungsmöglichkeit zu erreichen, sollten die eingezeichneten Regler zur Verfügung stehen. Regler 1+2 definieren die Größe des Eingangssignals. Regler 3+4 sind für die Einstellung der Rückkoppelung notwendig. Mit ihnen kann die Dynamik und damit auch

die Zahl der Wiederholungen, d.h. die Dichte der Schichtung genau festgelegt werden. Schichtung heißt: mehrfache Wiederholung des Signals mit dem aktuellen Eingangssignal gemischt. Die Regler 5+6 kontrollieren die Gesamtdynamik.

Cristóbal Halffter⁷³ schreibt für seine Komposition *Noche pasiva* zwei Verzögerungszeiten – 10 und 12 Sekunden – vor, die während des ganzen Werks konstant bleiben. Für die Uraufführung am 10.2.1971 im Südwestfunk Baden-Baden konstruierte Lothar Graf⁷⁴, Meßtechniker des SWF, zwei Spezialmaschinen, modifizierte Telefunken M 5, bei denen das Band nach dem Aufnahmekopf über mehrere Umlenkrollen, den Verzögerungszeiten entsprechend, zum Wiedergabekopf geleitet wurde. Mit diesen Geräten konnte der Jauleffekt nahezu ganz unterbunden und der Aufwand von "vier" Magnetofonen vermieden werden. In Abbildung T45 ist ein Auszug aus dem Aufbauvorschlag Halffters zu sehen:

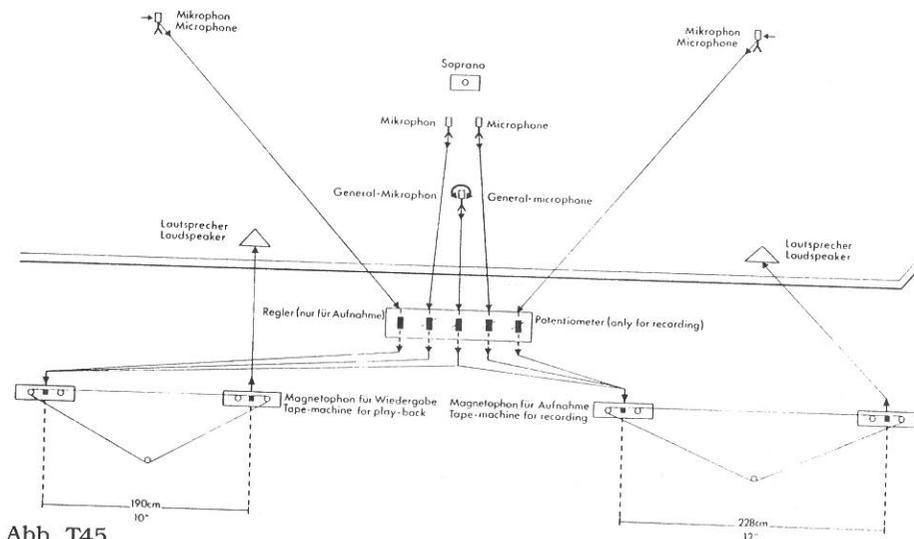


Abb. T45

Die Zeitfunktionen der Komposition werden fortlaufend verändert, die Verzögerungszeiten bleiben konstant. Es entstehen zwischen dem Originalklang und den beiden Echos immer neue musikalische Überlappungen. Mit einem *Generalmikrofon*, über das auch die Lautsprecherklänge zu hören sind, sollte eine Schichtung (Feedback) erreicht werden. Das Klangergebnis dieses Mikrofons war jedoch zu räumlich, so daß die Größe der Rückkoppelung wie in Abbil-

⁷³ Cristóbal Halffter, "NOCHE PASIVA DEL SENTIDO" für Sopran, zwei Schlagzeuger und Live-Elektronik, Wien: Verlag UE, 1971 (vergl. "Chronologie").
⁷⁴ vgl. Band 2, "Chronologie", Zusammenarbeit mit SWF-Technik.

dung T44 direkt mit dem Regiepult eingestellt wird. Halffter setzt die Verzögerung im Sinne einer kanonischen Wiederholung ein, der Klang der Solostimme bleibt unverändert.

NOCHE PASIVA DEL SENTIDO
(San Juan de la Cruz)

CRISTOBAL HALFFTER
(1930)

Abb. T46

Das kleine Notenbeispiel zeigt, daß die Mikrofone der beiden Schlagzeuger immer *nach* dem Anschlag geöffnet werden. Verzögert wird nur der *originale* Nachhall des jeweiligen Instruments ohne Einschwingvorgang, was immer wieder zu sehr feinen und diffusen Klanggestalten führt: Eine einfache, doch wirkungsvolle Möglichkeit der Elektronischen Klangumformung.

In Zusammenarbeit mit der Manfred-Schoof-Group⁷⁵ ist in den Jahren 1976/77 eine neue Improvisationsform für den Jazz kreiert worden: das "Statement".

Während übliche Free-Jazz Konzerte meist mit der Vorstellung der Solisten beginnen, entfällt bei der neuen Form dieser Eingangsteil. Die Interpreten spielen nach dem Auftritt ein Ensemblestück, innerhalb der anschließenden ca. einstündigen Improvisation werden nun diese Statements eingeschoben, d.h. jeder Musiker spielt, quasi als seine eigene Vorstellung, einen Soloteil mit und gegen sich selbst. Ein Beispiel: mit Hilfe der Verzögerung (8 bis 14 Sekunden) und Schichtung entwickelte Manfred Schoof mit statischen Tönen auf dem Flügelhorn einen Klangraum. Nach dem Erreichen eines gewünschten Tonmaterials, einer Tondichte, begann die eigentliche Improvisation mit der Trompete, wobei dem Klangraum eine musikalisch und akustisch begleitende Funktion zugeordnet wurde. Den Abschluß seines Statements bildete eine rhythmische Improvisation gegen sich selbst. Eine kürzere Verzögerungszeit mit kleiner Schichtung ermöglichte zwischen dem Solisten und den verzögerten

⁷⁵ vgl. Band 2, "Chronologie", Free-Jazz.

gerten Signalen ein rhythmisches Gegenspiel, das bis zum Klangchaos führen konnte. Das oder die Verzögerungsgeräte, vor allem ihre dynamische Kontrolle, wurden zu einem improvisierenden Instrument, dessen Bedienung eine sensible musikalische Mitgestaltung abverlangte: nicht determinierte, sondern frei improvisierte Elektronische Klangumformung.

Abb. T47

Die Klavierkadenz in Kazimierz Serockis "Pianophonie"⁷⁶ beginnt mit einer zweifachen Verzögerung, 9 und 16 Sekunden. Das Partiturbeispiel zeigt am Anfang die kanonischen Einsätze der Wiederholungen. Infolge einer unterschiedlichen Klangselektion des Klaviertons für die V1 und V2 (Verzögerung) geht der Charakter des Kanonischen verloren, man hört in der Zeitversetzung ein ähnliches, aber doch anderes, örtlich entfernteres Instrument. Die Filtereinstellungen werden, in jedem Kanal getrennt, während der Kadenz nach und nach geöffnet bis zum originalen Klavierton, dieser wiederum als letzte Steigerung noch zusätzlich transponiert. Die zeitliche Verschiebung des Klaviertons in dieser Form entwickelt eine eigene und doch mit dem originalen Klavierspiel verbundene Klanggestalt, einen faszinierenden Zeitraum, der vom Solisten mitgehört und mitgespielt werden muß.

Pierre Boulez: "...explosante fixe..."⁷⁷ für Vibraphon und Elektronische Klangumformung, 3. Satz. Der Klang des sehr schnellen Vibraphonspiels wird vierfach verzögert, die einzelnen Kanäle dann in unterschiedlichen Formen im Raum bewegt. Damit ist der ortsgebundene Klang des Instruments aufgelöst, der Raum so in die Komposition integriert, daß ein räumliches Hören im Sinne der geometrischen Vorlage unmöglich wird. Boulez komponierte eine sehr

⁷⁶ Kazimierz Serocki, Pianophonie für Klavier, Elektronische Klangumformung und Orchester, Celle: Verlag Moeck, 1976-1978.

⁷⁷ Pierre Boulez, "...explosante fixe..." für Vibraphon, mit Genehmigung des Komponisten für Vibraphon und Elektronische Klangumformung, bearbeitet von Hans Peter Haller.

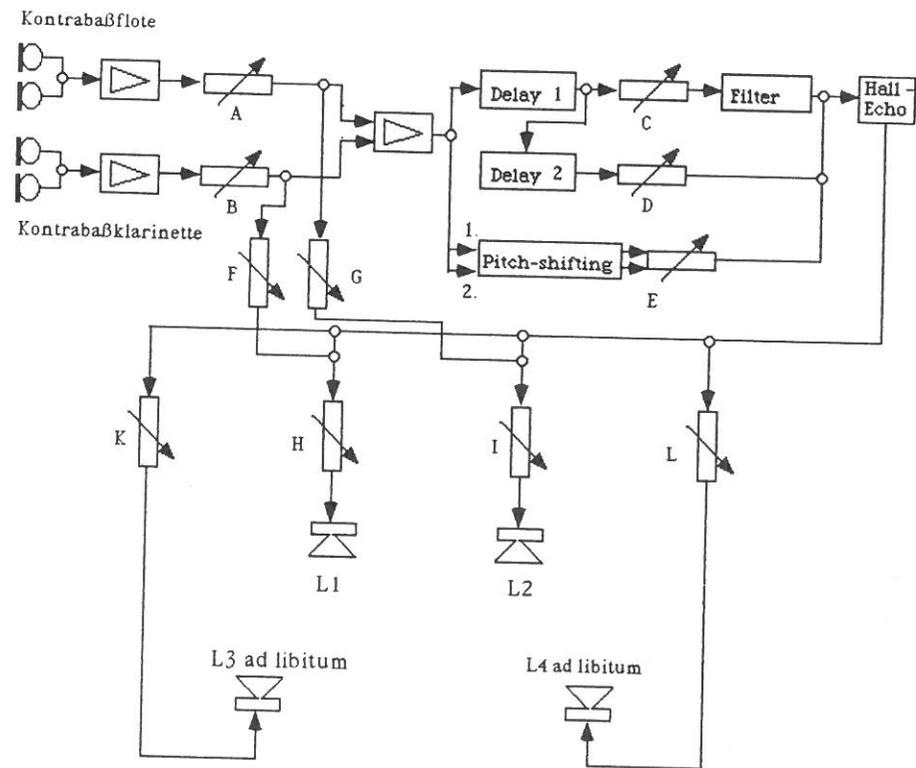
komplexe Struktur, die durch die vierfache elektronische Zeitversetzung und Schichtung der gespielten Töne zusätzlich verdichtet wird, mit dem Ergebnis eines in der klanglichen Raumtiefe und Spannung immer größer werdenden und dann sich gegen Ende auflösenden Klangkontinuums.

Letztes Beispiel: Luigi Nono *A Pierre* (vergleiche Fußnote 32) für Kontrabaßflöte, Kontrabaßklarinetten und Elektronische Klangumformung. In dieser Komposition hat der Komponist die vollendete Synthese zwischen Originalklang der Instrumente, Klangraum und Zeitraum verwirklicht. Erste Verzögerung nach 12 Sekunden: selektierter Instrumentalklang. Nach 24 Sekunden wird der Originalklang wieder hörbar. Die Musiker variieren auf ihrem Instrument vom feinsten Anblasgeräusch bis zum klingenden Ton, obertonfrei oder nur Obertöne. Die Dynamik bewegt sich zwischen fünffachem Pianissimo und Piano mit einem Ausbruch nach Forte. Die Klangergebnisse müssen im Konzert so abgemischt werden (Klangregie), daß der Zuhörer keinen Unterschied zwischen dem gespielten Originalklang und dem verzögerten Zeitraum wahrnimmt. Durch den zeitlich versetzten Wechsel zwischen originalelem und selektiertem Klang entstehen akustische Raumtiefen, die keine geometrischen Grenzen erkennen lassen (Abb. T48, Ausschnitt aus der Legende zu *A Pierre*). Die Beispiele mögen verdeutlichen, daß die traditionelle kanonische Form heute mittels der elektronischen Geräte, der Elektronischen Klangumformung, Klangerweiterung zu einem, unter Umständen die geometrischen Grenzen sprengenden Zeitraum weitergeführt werden kann. Die Funktion der Elektronischen Klangumformung und ihre klanglichen Ergebnisse sind bekannt, unbekannt bleibt immer das Verhalten des Interpreten und das Einwirken der Raumakustik auf diese Ergebnisse, auf die erdachten technischen Schaltungen zur Klangerweiterung.

Eine ausführlichere Beschreibung der genannten Beispiele folgt im zweiten Band der Dokumentation "Chronologie".

Wie das mechanische Musikinstrument ist auch der Lautsprecher ein Instrument, dessen klangliche Abstrahlung sich von Interpretation zu Interpretation, von Konzertsaal zu Konzertsaal ändert. Die klassische Physik setzt voraus, daß Messungen und Vorhersagen exakt und eindeutig sein sollten, doch Fehlbedienung und Fehler der Meß- und Beobachtungsgeräte selbst, sowie akustische Einflüsse an ihrem Standort, machen diese Forderung nur bedingt möglich. Für die Musik, für die musikalische Akustik sind diese Fehler lebenswichtig, sie machen ein technisches Gerät zum musikalischen Instrument, von dessen Bedienung nicht nur exakte Klangergebnisse, sondern vor allem eine kreative Interpretation gefordert wird. Komponisten, Interpreten und Klangregisseure müssen auch, ja heute noch mehr, wieder den Klang im Raum hören, erhören. Die Technik hat der Musik ein neues Instrumentarium ge-

Nono: A Pierre



Variable Tonhöhentransposition, sinusförmig gesteuert: Kanal 1 = kleine Sept ↓
 Kanal 2 = Tritonus ↓
 Bewegung (Vibrato): Zeit: Kanal 1 = 10-12 Sek. / Kanal 2 = 5-6 Sek.
 Modulationstiefe (depth): Kanal 1+2 = ca. große Sekunde

Filter: 3 Bandpässe 1. = 30-300 Hz, 2. = 675-1012 Hz, 3. = 2278-3417 Hz
 Nachhall (Echo): 1 - 3 Sekunden, abhängig von der Raumakustik
 Zeitverzögerung (Delay): 1. = 12 Sekunden / 2. = 12 Sekunden

Abb. T48

schenkt, das die Schaffung neuer Klanggestalten ermöglicht, das aber auch voraussetzt, daß neue Spielarten und anderes Hören erlernt werden. In diesem Sinne sind die Worte zu verstehen:

**Musik ohne Klangraum ist undenkbar,
der Interpret spielt im Raum,
der Komponist komponiert im Raum, für den Raum.
Klang- und Zeitraum müssen wieder mit zur formalen Funktion
einer Komposition, einer Interpretation werden.**

Es gibt Musiker, es gibt Komponisten, die kein Interesse für physikalische Akustik, für Psychoakustik zeigen, ja die direkt ablehnen zu wissen, warum ein Instrument, eine Stimme so oder so klingt. Ihnen ist mit dieser Einführung in die Technik der Elektronischen Klangumformung wenig geholfen. Ich möchte daher die Musiker ansprechen, die auf der Suche sind, nicht nur nach neuen Kompositionsstrukturen, sondern auch nach neuen Klanggestalten, neuen Klang- und Zeiträumen. Ihnen allen, den Erst- und Zweitgenannten, empfehle ich, nochmals das Vorwort zu diesem Teil und die Einführung zu Juan G. Roederers⁷⁸ *Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik* zu lesen, in denen verständlich und aufklärend diese Probleme angesprochen werden.

Eine technische Einführung für Nichttechniker muß thematisch begrenzt sein, d.h. meine Beschreibungen sind, wie schon an anderer Stelle gesagt, auf die Arbeit im Experimentalstudio der Heinrich-Strobel-Stiftung des Südwestfunks bezogen, sie basieren auf den in diesem Studio persönlich gemachten Experimenten und praktischen Erfahrungen mit Technikern, mit Interpreten und Komponisten. Die Elektronische Klangumformung, Klangerweiterung ist ein Bereich des großen Komplexes *Live-Elektronik*. So berühren auch meine Beschreibungen darüber nur einen Ausschnitt.

Meine als Anhang angefügte kleine Schwingungslehre möchte die Musiker auf die Geheimnisse der physikalischen Akustik aufmerksam machen, die sich noch gegen eine Verbindung zwischen Musik und Physik wehren.

Anhang 1

Tabelle Ia

Trägerwelle	Modulatorwelle	oberes Seitenband	unteres Seitenband
Ue1	Ue2	o.S.	u.S.
65 Hz C	65 Hz C	130 Hz c	0 Hz
65 Hz C	69 Hz Cis	134 Hz / c	4 Hz
65 Hz C	73 Hz D	138 Hz cis	8 Hz
65 Hz C	77 Hz Dis	142 Hz < d	12 Hz
65 Hz C	82 Hz E	147 Hz >> d	17 Hz 2Cis
65 Hz C	87 Hz F	152 Hz < dis	22 Hz >> 2F
65 Hz C	92 Hz Fis	157 Hz > dis	27 Hz 2A
65 Hz C	97 Hz G	162 Hz < e	32 Hz 1C
65 Hz C	103 Hz Cis	168 Hz > e	38 Hz 1Dis
65 Hz C	110 Hz A	175 Hz >> f	45 Hz >> 1Fis
65 Hz C	116 Hz Ais	181 Hz < fis	51 Hz 1Cis
65 Hz C	123 Hz H	188 Hz > fis	58 Hz 1Ais
65 Hz C	130 Hz c	195 Hz g	65 Hz C
65 Hz C	138 Hz cis	203 Hz < gis	73 Hz D
65 Hz C	146 Hz d	211 Hz > gis	81 Hz >> E
65 Hz C	155 Hz dis	220 Hz a	90 Hz >> Fis
65 Hz C	164 Hz e	229 Hz < ais	99 Hz > G
65 Hz C	174 Hz f	239 Hz > ais	109 Hz >> A
65 Hz C	185 Hz fis	250 Hz > h	120 Hz / Ais
65 Hz C	196 Hz g	261 Hz c1	131 Hz >> c
65 Hz C	207 Hz gis	272 Hz < cis1	142 Hz / cis
65 Hz C	220 Hz a	285 Hz / cis1	155 Hz dis
65 Hz C	233 Hz ais	298 Hz > d1	186 Hz / e
65 Hz C	246 Hz h	311 Hz dis1	181 Hz >> fis
65 Hz C	261 Hz c	326 Hz >> e1	196 Hz g
65 Hz C	277 Hz cis1	342 Hz < f1	212 Hz > gis
65 Hz C	293 Hz d1	358 Hz / f1	228 Hz / a
65 Hz C	311 Hz dis1	376 Hz > fis1	246 Hz h
65 Hz C	329 Hz e1	394 Hz >> g1	264 Hz >> c1
65 Hz C	349 Hz f1	414 Hz >> gis1	284 Hz > cis1
65 Hz C	369 Hz fis1	434 Hz < a1	304 Hz / d1
65 Hz C	392 Hz g1	457 Hz / a1	327 Hz >> e1
65 Hz C	415 Hz gis1	480 Hz / h1	350 Hz >> f1
65 Hz C	440 Hz a1	505 Hz > h1	375 Hz > fis1
65 Hz C	466 Hz ais1	531 Hz > c2	401 Hz >> g1
65 Hz C	493 Hz h1	558 Hz >> cis2	428 Hz / gis1

>< = ungefähr, > = höher, < = tiefer, / = ca. 1/4 Ton höher

⁷⁸ Juan G. Roederer, "Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik", Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1975.

Tabelle Ib

Ue1		Ue2	o.S.	u.S.
65 Hz	C	523 Hz c2	588 Hz >> d2	458 Hz < ais1
65 Hz	C	554 Hz cis2	619 Hz >> dis2	489 Hz >> h1
65 Hz	C	587 Hz d2	652 Hz >> e2	522 Hz >> c2
65 Hz	C	622 Hz dis	687 Hz >> f2	557 Hz >> cis2
65 Hz	C	659 Hz e2	724 Hz < fis2	594 Hz >> d2
65 Hz	C	698 Hz f2	763 Hz < g2	633 Hz > dis2
65 Hz	C	739 Hz fis2	804 Hz > g2	674 Hz > e2
65 Hz	C	783 Hz g2	848 Hz > gis2	718 Hz / f2
65 Hz	C	830 Hz gis2	895 Hz > a2	765 Hz < g2
65 Hz	C	880 Hz a2	945 Hz > ais2	815 Hz < gis2
65 Hz	C	932 Hz ais2	991 Hz >> h2	861 Hz / a2
65 Hz	C	987 Hz h2	1052 Hz >> c3	922 Hz < ais2
65 Hz	C	1046 Hz c3	1111 Hz >> cis3	981 Hz >> h2
65 Hz	C	1108 Hz cis3	1173 Hz >> d3	1043 Hz >> c3
65 Hz	C	1174 Hz d3	1239 Hz >> dis3	1109 Hz >> cis3
65 Hz	C	1244 Hz dis3	1309 Hz >> e3	1179 Hz >> d3
65 Hz	C	1318 Hz e3	1383 Hz < f3	1253 Hz >> dis3
65 Hz	C	1396 Hz f3	1461 Hz < fis3	1331 Hz > e3
65 Hz	C	1479 Hz fis3	1544 Hz < g3	1414 Hz > f3
65 Hz	C	1567 Hz g3	1632 Hz < gis3	1502 Hz > fis3
65 Hz	C	1661 Hz gis3	1726 Hz < a3	1596 Hz > g3
65 Hz	C	1760 Hz a3	1825 Hz < ais3	1695 Hz > gis3
65 Hz	C	1864 Hz ais3	1929 Hz < h3	1799 Hz > a3
65 Hz	C	1975 Hz h3	2040 Hz / h3	1910 Hz > ais3
65 Hz	C	2093 Hz c4	2158 Hz / c4	2028 Hz > h3
65 Hz	C	2217 Hz cis4	2282 Hz > cis4	2152 Hz / c4
65 Hz	C	2349 Hz d4	2414 Hz / cis4	2284 Hz / cis4
65 Hz	C	2489 Hz dis4	2554 Hz > dis4	2424 Hz / d4
65 Hz	C	2637 Hz e4	2702 Hz > e4	2572 Hz / dis4
65 Hz	C	2793 Hz f4	2858 Hz > f4	2728 Hz / e4
65 Hz	C	2959 Hz fis4	3024 Hz > fis4	2894 Hz / f4
65 Hz	C	3135 Hz g4	3200 Hz > g4	3070 Hz / fis4
65 Hz	C	3322 Hz gis4	3381 Hz > gis4	3251 Hz / g4
65 Hz	C	3520 Hz a4	3585 Hz a4	3455 Hz < a4
65 Hz	C	3729 Hz ais4	3794 Hz ais4	3664 Hz < ais4
65 Hz	C	3951 Hz h4	4016 Hz h4	3886 Hz < h4

Tabelle IIa

Ue1		Ue2	o.S.	u.S.
65 Hz	C	4186 Hz c5	4251 Hz > c5	4121 Hz >> c5
69 Hz	Cis	4186 Hz c5	4255 Hz	4117 Hz
73 Hz	D	4186 Hz c5	4259 Hz	4113 Hz
77 Hz	Dis	4186 Hz c5	4263 Hz	4109 Hz
82 Hz	E	4186 Hz c5	4268 Hz	4104 Hz
87 Hz	F	4186 Hz c5	4273 Hz	4099 Hz
92 Hz	Fis	4186 Hz c5	4278 Hz	4094 Hz
97 Hz	G	4186 Hz c5	4283 Hz	4089 Hz
103 Hz	Gis	4186 Hz c5	4289 Hz	4083 Hz
110 Hz	A	4186 Hz c5	4296 Hz	4076 Hz
116 Hz	Ais	4186 Hz c5	4302 Hz	4070 Hz
123 Hz	H	4186 Hz c5	4309 Hz	4063 Hz
130 Hz	c	4186 Hz c5	4316 Hz	4056 Hz
138 Hz	cis	4186 Hz c5	4324 Hz	4048 Hz
146 Hz	d	4186 Hz c5	4332 Hz	4040 Hz
155 Hz	dis	4186 Hz c5	4341 Hz	4031 Hz
164 Hz	e	4186 Hz c5	4350 Hz	4022 Hz
174 Hz	f	4186 Hz c5	4360 Hz	4012 Hz
185 Hz	fis	4186 Hz c5	4371 Hz	4001 Hz
196 Hz	g	4186 Hz c5	4382 Hz	3990 Hz
207 Hz	gis	4186 Hz c5	4393 Hz	3979 Hz
220 Hz	a	4186 Hz c5	4406 Hz	3966 Hz
233 Hz	ais	4186 Hz c5	4419 Hz	3953 Hz >> h4
246 Hz	h	4186 Hz c5	4432 Hz cis5	3940 Hz
261 Hz	c1	4186 Hz c5	4447 Hz	3925 Hz
277 Hz	cis1	4186 Hz c5	4463 Hz	3909 Hz
293 Hz	d1	4186 Hz c5	4479 Hz	3893 Hz
311 Hz	dis1	4186 Hz c5	4497 Hz	3875 Hz
329 Hz	e1	4186 Hz c5	4515 Hz	3957 Hz
349 Hz	f1	4186 Hz c5	4535 Hz	3837 Hz
369 Hz	fis1	4186 Hz c5	4555 Hz	3817 Hz
392 Hz	g1	4186 Hz c5	4578 Hz	3794 Hz
415 Hz	gis1	4186 Hz c5	4601 Hz	3771 Hz
440 Hz	a1	4186 Hz c5	4626 Hz	3746 Hz
466 Hz	ais1	4186 Hz c5	4652 Hz	3720 Hz >> ais4
493 Hz	h1	4186 Hz c5	4679 Hz	3693 Hz

Tabelle IIb

Ue1		Ue2		o.S.	u.S.
523 Hz	c2	4186 Hz	c5	4709 Hz >> d5	3663 Hz
554 Hz	cis2	4186 Hz	c5	4740 HZ	3632 Hz
587 Hz	d2	4186 Hz	c5	4773 Hz	3599 Hz
622 Hz	dis2	4186 Hz	c5	4808 Hz	3564 Hz
659 Hz	e2	4186 Hz	c5	4845 HZ	3527 Hz >> a4
698 Hz	f2	4186 Hz	c5	4884 Hz	3488 Hz
739 Hz	fis2	4186 Hz	c5	4925 Hz	3447 Hz
783 Hz	g2	4186 Hz	c5	4969 Hz >> dis5	3403 Hz
830 Hz	gis2	4186 Hz	c5	5016 HZ	3356 Hz
880 Hz	a2	4186 Hz	c5	5066 HZ	3306 Hz >> gis4
932 Hz	ais2	4186 Hz	c5	5118 HZ	3254 Hz
987 Hz	h2	4186 Hz	c5	5173 HZ	3199 Hz
1046 Hz	c3	4186 Hz	c5	5232 Hz	3140 Hz >> g4
1108 Hz	cis3	4186 Hz	c5	5294 Hz >> e5	3078 Hz
1174 Hz	d3	4186 Hz	c5	5360 Hz	3012 Hz
1244 Hz	dis3	4186 Hz	c5	5430 Hz	2942 Hz >> fis4
1318 Hz	e3	4186 Hz	c5	5504 Hz	2868 Hz
1396 Hz	f3	4186 Hz	c5	5582 Hz >> f5	2790 Hz >> f4
1479 Hz	fis3	4186 Hz	c5	5665 HZ	2707 Hz
1567 Hz	g3	4186 Hz	c5	5753 Hz	2619 Hz >> e4
1661 Hz	gis3	4186 Hz	c5	5847 HZ	2525 Hz > dis4
1760 Hz	a3	4186 Hz	c5	5946 Hz > fis5	2426 Hz < dis4
1864 Hz	ais3	4186 Hz	c5	6050 Hz	2322 Hz < d4
1975 Hz	h3	4186 Hz	c5	6161 Hz	2211 Hz >> cis4
2093 Hz	c4	4186 Hz	c5	6279 Hz >> g5	2093 Hz c4
2217 Hz	cis4	4186 Hz	c5	6403 Hz	1969 Hz >> h3
2349 Hz	d4	4186 Hz	c5	6535 Hz	1837 Hz < ais3
2489 Hz	dis4	4186 Hz	c5	6675 Hz > gis5	1697 Hz > gis3
2637 Hz	e4	4186 Hz	c5	6823 Hz	1549 Hz >> g3
2793 Hz	f4	4186 Hz	c5	6979 Hz < a5	1393 Hz >> f3
2959 Hz	fis4	4186 Hz	c5	7145 Hz	1227 Hz < dis3
3135 Hz	g4	4186 Hz	c5	7321 Hz	1051 Hz >> c3
3322 Hz	gis4	4186 Hz	c5	7508 Hz > ais5	864 Hz < a2
3520 Hz	a4	4186 Hz	c5	7706 Hz	666 Hz >> e2
3729 Hz	ais4	4186 Hz	c5	7915 Hz >> h5	457 Hz / a1
3951 Hz	h4	4186 Hz	c5	8137 Hz	235 Hz >> ais

Tabelle IIIa

Ue1		Ue2		o.S.	u.S.
65 Hz	C	4186 Hz	c5	4251 Hz > c5	4121 Hz >> c5
69 Hz	Cis	3951 Hz	h4	4020 Hz / h4	3882 Hz < h4
73 Hz	D	3729 Hz	ais4	3802 Hz / ais4	3656 Hz / a4
77 Hz	Dis	3520 Hz	a4	3597 Hz > a4	3443 Hz < a4
82 Hz	E	3322 HZ	gis4	3404 Hz > gis4	3240 Hz / g4
87 Hz	F	3135 Hz	g4	3222 Hz / gis4	3048 Hz < g4
92 Hz	Fis	2959 Hz	fis4	3051 Hz / g4	2867 Hz < fis4
97 Hz	G	2793 Hz	f4	2890 Hz / fis4	2696 Hz > e4
103 Hz	Gas	2637 Hz	e4	2740 Hz < fis4	2534 Hz > dis4
110 Hz	A	2489 Hz	dis4	2599 Hz < e4	2379 Hz > d4
116 Hz	Ais	2349 Hz	d4	2465 Hz >> dis4	2233 Hz > cis4
123 Hz	H	2217 Hz	cis4	2340 Hz >> d4	2094 Hz c4
130 Hz	c	2093 Hz	c4	2223 Hz >> cis4	1963 Hz < h3
138 Hz	cis	1975 Hz	h3	2113 Hz / c4	1837 Hz < ais3
146 Hz	d	1864 Hz	ais3	2010 Hz > h3	1718 Hz / gis3
155 Hz	dis	1760 Hz	a3	1915 Hz / ais3	1605 Hz / g3
164 Hz	e	1661 Hz	gis3	1825 Hz < ais3	1497 Hz > fis3
174 Hz	f	1567 Hz	g3	1741 Hz < a3	1393 Hz >> f3
185 Hz	fis	1497 Hz	fis3	1664 Hz >> gis3	1294 Hz < e3
196 Hz	g	1396 Hz	f3	1592 Hz > g3	1200 Hz > d3
207 Hz	gis	1318 Hz	e3	1525 Hz > fis3	1111 Hz >> cis3
220 Hz	a	1244 Hz	dis3	1464 Hz > f3	1024 Hz < c3
233 Hz	ais	1174 Hz	d3	1407 Hz < f3	941 Hz > ais2
246 Hz	h	1108 Hz	cis3	1354 Hz / e3	862 Hz < a2
261 Hz	c1	1046 Hz	c3	1307 Hz < e3	785 Hz >> g2
277 Hz	cis1	987 Hz	h2	1264 Hz > dis3	710 Hz > f2
293 Hz	d1	932 Hz	ais2	1225 Hz < dis3	639 Hz > e2
311 Hz	dis1	880 Hz	a2	1191 Hz > d3	569 Hz / cis2
329 Hz	e1	830 Hz	gis2	1159 Hz > cis3	501 Hz > h1
349 Hz	f1	783 Hz	g2	1132 Hz > cis3	434 Hz < a1
369 Hz	fis1	739 Hz	fis2	1108 Hz cis3	370 Hz >> fis1
392 Hz	g1	698 Hz	f2	1090 Hz < cis3	306 Hz < dis1
415 Hz	gis1	659 Hz	e2	1074 Hz / cis3	244 Hz < h
440 Hz	a1	622 Hz	dis2	1062 Hz > c3	182 Hz < fis
466 Hz	ais1	587 Hz	d2	1053 Hz >> c3	121 Hz < H
493 Hz	h1	554 Hz	cis2	1047 Hz >> c3	61 Hz >> 1H

Tabelle IIIb

Ue1		Ue2		o.S.		u.S.
523 Hz	c2	523 Hz	c2	1046 Hz	c3	0 Hz
554 Hz	cis2	493 Hz	h1	1047 Hz	>< c3	61 Hz >< 1H
587 Hz	d2	466 Hz	ais1	1053 Hz	>< c3	121 Hz < H
622 Hz	dis2	440 Hz	a1	1062 Hz	> c3	182 Hz < fis
659 Hz	e2	415 Hz	gis1	1074 Hz	/ c3	244 Hz < h
698 Hz	f2	392 Hz	g1	1090 Hz	< cis3	306 Hz < dis1
739 Hz	fis2	369 Hz	fis1	1108 Hz	cis3	370 Hz >< fis1
783 Hz	g2	349 Hz	f1	1132 Hz	> cis3	434 Hz < a1
830 Hz	gis2	329 Hz	e1	1159 Hz	> cis3	501 Hz > h1
880 Hz	a2	311 Hz	dis1	1191 Hz	> d3	569 Hz / cis2
932 Hz	ais2	293 Hz	d1	1225 Hz	< dis3	639 Hz > e2
987 Hz	h2	277 Hz	cis1	1264 Hz	> dis3	710 Hz > f2
1046 Hz	c3	261 Hz	c1	1307 Hz	< e3	785 Hz >< g2
1108 Hz	cis3	246 Hz	h	1354 Hz	/ e3	862 Hz < a2
1174 Hz	d3	233 Hz	ais	1407 Hz	< f3	941 Hz > ais2
1244 Hz	dis3	220 Hz	a	1464 Hz	> f3	1024 Hz < c3
1318 Hz	e3	207 Hz	gis	1525 Hz	> fis3	1111 Hz >< cis3
1396 Hz	f3	196 Hz	g	1592 Hz	> g3	1200 Hz > d3
1497 Hz	fis3	185 Hz	fis	1664 Hz	>< gis3	1294 Hz < e3
1567 Hz	g3	174 Hz	f	1741 Hz	< a3	1393 Hz >< f3
1661 Hz	gis3	164 Hz	e	1825 Hz	< ais3	1497 Hz > fis3
1760 Hz	a3	155 Hz	dis	1915 Hz	/ ais3	1605 Hz / g3
1864 Hz	ais3	146 Hz	d	2010 Hz	> h3	1718 Hz / gis3
1975 Hz	h3	138 Hz	cis	2113 Hz	/ c4	1837 Hz < ais3
2093 Hz	c4	130 Hz	c	2223 Hz	>< cis4	1963 Hz < h3
2217 Hz	cis4	123 Hz	H	2340 Hz	>< d4	2094 Hz c4
2349 Hz	d4	116 Hz	Ais	2465 Hz	>< dis4	2233 Hz > cis4
2489 Hz	dis4	110 Hz	A	2599 Hz	< e4	2379 Hz > d4
2637 Hz	e4	103 Hz	Gas	2740 Hz	< f4	2534 Hz > dis4
2793 Hz	f4	97 Hz	G	2890 Hz	/ f4	2696 Hz > e4
2959 Hz	fis4	92 Hz	Fis	3051 Hz	/ fis4	2867 Hz < fis4
3135 Hz	g4	87 Hz	F	3222 Hz	/ g4	3048 Hz < g4
3322 Hz	gis4	82 Hz	E	3404 Hz	> gis4	3240 Hz / g4
3520 Hz	a4	77 Hz	Dis	3597 Hz	> a4	3443 Hz < a4
3729 Hz	ais4	73 Hz	D	3802 Hz	/ ais4	3656 Hz / a4
3951 Hz	h4	69 Hz	Cis	4020 Hz	/ h4	3882 Hz < h4

KLEINE SCHWINGUNGSLEHRE

Grundbegriffe der hörbaren Schwingungen für musikalische Nicht-Physiker

1. Einführende Gedanken zur Schwingungslehre

Schon Hermann von Helmholtz⁷⁹ sagt in seiner Lehre von den "Tonempfindungen", daß Grenzgebiete von Wissenschaften bisher getrennt nebeneinander gestanden haben, so z.B. die physikalische und physiologische Akustik auf der einen, die Musikwissenschaft und Ästhetik auf der anderen Seite.

Zitat Helmholtz:

Zwar bedient sich die Akustik überall der aus der Harmonielehre entnommenen Begriffe und Namen, sie spricht von der Tonleiter, den Intervallen, Konsonanzen, usw.; zwar beginnen die Lehrbücher über Generalbaß gewöhnlich mit einem physikalischen Kapitel, welches von den Schwingungszahlen der Töne redet und die Verhältnisse derselben für die verschiedenen Intervalle festsetzt, aber bisher ist diese Verbindung der Akustik mit der Musikwissenschaft eine rein äußerliche geblieben, eigentlich mehr ein Zeichen, daß man das Bedürfnis einer Verbindung der genannten Wissenschaften fühlte und anerkannte, als daß man eine solche tatsächlich herzustellen wußte.

(Zitatende)

Helmholtz fährt dann fort, daß die Ästhetik der Musik denjenigen Fragen, deren Entscheidung mehr auf psychologischen als auf sinnlichen Momenten beruht, unverkennbare Fortschritte gebracht hat, namentlich dadurch, daß man den Begriff der Bewegung bei der Untersuchung der musikalischen Kunstwerke betonte. In der Musik sind es wirklich die Tonempfindungen, welche das Material der Kunst bilden – wenigstens soweit sie in der Musik zur Geltung kommen – und nicht die Vorstellung äußerlicher Gegenstände und Vorgänge.

Zitat Helmholtz:

Es ist klar, daß die Musik eine unmittelbarere Verbindung mit der sinnlichen Empfindung hat, als irgendeine der anderen Künste; und daraus folgt dann, daß die Lehre von den Gehörempfindungen beru-

⁷⁹ Hermann von Helmholtz, "Die Lehre von den Tonempfindungen". Braunschweig: Verlag Fr. Vieweg & Sohn, 1913.