

MUSIKALISCHE, ELEKTROAKUSTISCHE UND SCHALLWISSENSCHAFTLICHE GRENZPROBLEME

GRAVESANER BLÄTTER

HERAUSGEBER: PROFESSOR HERMANN SCHERCHEN

ARS-VIVA-VERLAG (HERMANN SCHERCHEN) GMBH
MAINZ · MAI 1956

HEFT 4

GRAVESANO

Elektroakustisches Experimentalstudio Hermann Scherchen

(17.—23. Mai 1956)

Kolloquium Nr. I

„Künstlicher Nachhall und erster Rückwurf“

Technische Durchführung: Dr. Kuhl (Nürnberg)

Assistent: Herr Plenge (Berlin)

Teilnehmende:

Prof. Cremer (Berlin)	Dr. Scerri (Lugano)
Dr. Kuhl (Nürnberg)	Dr. Capek (Wien)
Dr. Weisse (Frankfurt/M.)	Cheftechn. Gallia (Budapest)
Dr. Alexander (London)	Ing. Cacciotti (Turin)
Ing. Cordonier (Paris)	Ing. Söding (Hannover)
Ing. Lauridsen (Kopenhagen)	Dr. Cross (London)
Dr. Schlegel (Kopenhagen)	Ing. Hawke (Cambridge)
Ing. Meshein (Oslo)	Dr. Springer (Frankfurt/M.)
Chefing. Vermeulen (Eindhoven)	Dr. Nono (Venedig)
Ing. Franzen (Eindhoven)	Dr. Schaaf (Hannover)

Die Verhandlungen und Resultate des Kolloquiums werden veröffentlicht in Nr. V (Juli 1956) der Gravesaner Blätter.

Voranzeige des ARS-VIVA-VERLAGES: 1956 erscheint

„Informationstheorie und ästhetische Empfindung“

von Dr. André Moles, Paris

(Autorisierte Übersetzung: Hermann Scherchen)

GRAVESANER BLÄTTER

Eine Vierteljahresschrift für musikalische, elektroakustische und schallwissenschaftliche Grenzprobleme

NR. IV MAI 1956

INHALT:

Seite

Manipulation und Konzeption

- I. Mozarts „Anleitung zum Komponieren von Walzern vermittelt zweier Würfel“ . . . Hermann Scherchen 3
- II. Zur Entwicklung der Serientechnik . . . Luigi Nono 14
- III. Brief an eine unbekannte Adresse . . . Hans Werner Henze 18

* * *

Über die Raumakustik im großen Konzert- und

Sendesaal des Hessischen Rundfunks in

Frankfurt/M. Karlhans Weisse 20

* * *

Klangumwandlungen durch Frequenzumsetzung L. Heck u. F. Bürck 35

Die Erregung von Eigentönen gedämpfter Räume

durch kurzzeitige Impulse Josef Capek 57

* * *

Inventar des Elektroakustischen Experimentalstudios Gravesano 64

Redaktion: Gravesano

Herausgeber: Hermann Scherchen

Mitarbeiter:

Dr. Alexander, BBC London	Dr. Schlegel, Kopenhagen
Prof. Cremer, Heinr.-Hertz.-Inst. Berlin	P. Souvtchinsky, Paris
Dr. Enkel, NWDR Köln	Dr. Steinecke, Darmstadt
Dr. Meyer-Eppler, Bonn	Ing. Sundblad, Stockholm
Dr. Moles, RDF Paris	Dr. Winkel, Techn. Universität Berlin
Dr. Nono, Venedig	Prof. Trautwein, Düsseldorf

Jedes Heft ist begleitet von einer akustisch illustrierenden Schallplatte.

Jahresab. mit 4 Schallplatten: 18,00 DM



Akustischer Zeitregler

für die Wiedergabe von Schallaufnahmen mit kontinuierlich veränderbarer Tonträgergeschwindigkeit ohne Änderung der Tonhöhe der Schallaufnahme. Regelbereich 50-200% der Aufnahmezeit. Für Sprache und Musik.

Acoustical Time Regulator

Varies the speed of a tape recording without affecting the tone. Limits: 50-200% of actual recording time. For instrumental and vocal recordings.



TELEFONBAU UND NORMALZEIT · FRANKFURT AM MAIN

Mainzer Landstraße 134-146

MANIPULATION UND KONZEPTION

I.

Mozarts „Anleitung zum Komponieren von Walzern
vermittelt zweier Würfel“

VON HERMANN SCHERCHEN

ANLEITUNG

zum Componiren

von

WALZERN

So viele man will
vermittelt zweier Würfel

ohne etwas von der Musik oder
Composition zu verstehen

von

W.A. MOZART.

Preis Mk. 50

Eigenthum des Verlegers

N. SIMROCK, G.m.b.H. in BERLIN.

ANLEITUNG

Walzer mit 2 Würfeln zu componiren, ohne musikalisch zu sein, noch von der Composition etwas zu verstehen.

- 1) Die grossen Buchstaben A bis H, welche über den 8. Columnen der Zahlentafeln stehen, zeigen die 8 Takte eines jeden Theils des Walzers an, z. B. A den ersten, B den zweiten, C den dritten u. s. w. und die Zahlen in der Colonne darunter, zeigen die Nummer des Takts in den Noten.
- 2) Die Zahlen von 2 bis 12 geben die Summe der Zahlen, welche man mit zwei Würfel werfen kann.
- 3) Man wirft also z. B. für den ersten Takt des ersten Theils des Walzers mit zwei Würfeln 6, und sucht neben der Zahl 6 in der Colonne A, die Nummer des Takts 118 in der Musiktafel. Diesen Takt schreibt man aus und hat also den Anfang des Walzers. Nun wirft man für den zweiten Takt z. B. 9, sucht neben 9 unter B, und findet 84 in der Musiktafel. Diesen Takt schreibt man nun zum ersten, und so fährt man fort, bis man nach 8 Würfeln den ersten Theil des Walzers fertig hat. Dann setzt man das Repetitionszeichen und geht zum zweiten Theile über, will man nun einen längern Walzer haben, so fängt man noch einmal von vorne an, und so gehts ins Unendliche fort.

INSTRUCTION

To compose without the least knowledge of Music, German Walzer or Schleifer, by throwing a certain Number with two Dice.

- 1) The letters A—H, placed at the head of the 8 Columns of the Number Tables show the 8 times of each part of the Walzer. Viz. A, the first, B, the second, C, the third, etc and the numbers in the Column under the letters, show the number of the time in the notes.
- 2) The numbers from 2 to 12 show the sum of the number that can be thrown.
- 3) For instance, in throwing for the first time of the first part of the Walzer, with two dice, the number 6, one looks next to that number in the Column A, for the 118th time in the notes. This time is written down, and makes the beginning of the Walzer. — For the second time, for instance, the number 9, being thrown, turn to the same table Column B, and the number 84 shall be found. This time is put next to the first, & one continues, in this manner, till the dice shall be thrown all the eight times, when likewise the first part of the Walzer shall be finished. The sign of repetition is further placed & the second part begun, & in case a still longer Walzer be desired, the beginning is again in the same manner, & one continues as long as one pleases.

INSTRUCTION

Pour composer des Valses par le Moyen de deux Dèz, sans avoir la moindre Connaissance de la Musique ou de la Composition.

- 1) Les Lettres A—H, qui sont placées au dessus des 8 Colonne des Tables de nombres, montrent les 8 Mesures de chaque partie du Walzer. Par Exemple: A, la première, B, la seconde, C, la troisième, etc et les nombres dans la Colonne dessous les lettres démontrent le nombre de la mesure dans les notes.
- 2) Les nombres de 2 jusqu'à 12 montrent la somme du nombre qu'on peut jeter.
- 3) On jette donc par exemple pour la première Mesure de la première partie du Walzer avec deux dèz 6 & cherche près du nombre 6 dans la Colonne A, le nombre de la mesure 118 dans la Musique. L'on met cette mesure sur le papier & voilà ce qui fait le commencement du Walzer. Après ce la on jette pour la seconde Mesure p. e. 9, on cherche près de 9 sous B, & on trouve No. 84 de la table de musique. L'on met cette mesure a côté de la première & l'on continue ainsi jusqu'après avoir jetté les dèz huit fois, & alors on a achevé la première partie du Walzer, ensuite on fait le signe de répétition & commence la 2^e partie. Veut on avoir un Walzer plus long, on recommence de la même manière, & ainsi cela va à l'infini.

ZAHLENTAFEL.

Table de Chiffres.

	A	B	C	D	E	F	G	H
2	96	22	131	41	105	122	11	30
3	32	6	128	63	136	46	134	81
4	69	95	158	13	153	55	110	24
5	40	17	113	85	161	2	159	100
6	138	74	163	45	80	92	36	107
7	101	157	27	167	154	68	118	91
8	152	60	171	53	99	133	21	127
9	119	84	113	50	140	86	169	94
10	98	142	42	156	25	129	62	123
11	3	82	165	61	135	47	147	33
12	54	130	10	103	28	37	106	5

ERSTER THEIL.
Premiere Partie.

	A	B	C	D	E	F	G	H
2	70	121	26	9	112	49	109	14
3	117	39	126	56	124	18	116	83
4	66	139	15	132	73	58	145	79
5	90	176	7	34	67	160	52	170
6	25	133	64	125	76	136	1	93
7	138	71	150	29	101	162	23	151
8	16	155	57	175	43	168	89	172
9	120	88	48	166	51	115	72	111
10	65	77	19	82	137	38	149	8
11	102	4	31	164	144	59	173	28
12	35	20	108	92	12	124	44	131

ZWEITER THEIL.
Seconde Partie.

TABLE de MUSIQUE.

1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8.

9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16.

17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24.

25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32.

33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40.

41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48.

49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56.

57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64.

65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72.

73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80.

81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88.

89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96.

97. 98. 99. 100. 101. 102. 103. 104.

105. 106. 107. 108. 109. 110. 111. 112.

113. 114. 115. 116. 117. 118. 119. 120.

121. 122. 123. 124. 125. 126. 127. 128.

129. 130. 131. 132. 133. 134. 135. 136.

137. 138. 139. 140. 141. 142. 143. 144.

145. 146. 147. 148. 149. 150. 151. 152.

153. 154. 155. 156. 157. 158. 159. 160.

161. 162. 163. 164. 165. 166. 167. 168.

169. 170. 171. 172. 173. 174. 175. 176.

Der Scherz, durch *Manipulieren* von Zahlen künstliche Gebilde hervorzu- rufen — hier W. A. Mozart zugeschrieben, auf einem Manuskript der Florentiner Stadtbibliothek dem Namen Josef Haydns verbunden, durch einen Druck in Vene- dig aus dem Jahre 1802 endlich als modischer Spaß erhärtet — ist heute in einem gewissen Sinn erneut von Interesse. Ein wesentlicher Teil der Zwölf-ton- und der im Anschluß daran entwickelten allgemeinen Serientechnik der Musik basiert auf Manipulation mit Zahlen, woraus erst später klangliche Werte hervorgehen.

Die Manipulationen erfolgen bei Mozart durch die mittels zweier Würfel möglichen Kombinationen der Zahlen von 2–12:

- | | |
|-------------------------|--------------------------------|
| 2 = 1 + 1 | 8 = 1 + 7, 2 + 6, 3 + 5, 4 + 4 |
| 3 = 1 + 2 | 9 = 3 + 6, 4 + 5 |
| 4 = 1 + 3, 2 + 2 | 10 = 4 + 6, 5 + 5 |
| 5 = 1 + 4, 2 + 3 | 11 = 5 + 6 |
| 6 = 1 + 5, 2 + 4, 3 + 3 | 12 = 6 + 6 |
| 7 = 1 + 6, 2 + 5, 3 + 4 | |

Um den daraus resultierenden Würfelzahlen von 2–12 klangliche Resultate verbinden zu können, mußte ihnen ein musikalisches Grundschema angeschlos- sen werden (ausgedrückt durch die zwei Reihen A–H).

	A	B	C	D	E	F	G	H
2	2							
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								88

2
Mal
88
=
176
Zahlen=
orte

	A	B	C	D	E	F	G	H
2	89							
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								176

Beispiel 1

Dieses musikalische Grundschema ist das der akkordlichen Elementarkadenz:
TONICA — DOMINANTE — TONICA

(Beispiel 2)

Nun war nur noch nötig, ein bestimmtes klangliches Grundgebilde (hier z. B. einen Takt) bereit zu stellen für jeden, der durch Würfelzahlen und Kadenz- buchstaben fixierten Orte. Das geschah durch 176 Zahlen, die in die Karos der zweimal 88 Orte eingesetzt wurden. Dabei mußte in jede der 16 Rubriken (zweimal A–H) dasselbe klangliche Grundgebilde in 11 Varianten, durch die Zah- len ausgedrückt, einrücken können. Die geschickte Aufteilung der 176 Zahlen ver- mochte dem Mozart'schen Scherz eine ihn zunächst interessanter scheinende Bedeutung zu verleihen, als ihm in Wirklichkeit zukommt.

Die Ankündigung auf dem alten Simrock'schen Titelblatt: „mittels einer Zah- lenmanipulation die Kunst der Komposition ausüben zu können“ erhält aktuelle Bedeutung, sowie man akzeptiert, daß *allen* musikalischen Gestaltungsvorgängen Manipulationsschemen zu Grunde liegen. Tatsächlich bedeutet jeder neue Ab- schnitt in der Geschichte der Musik die Einführung einer neuen Klangmanipula- tion. So z. B. das mehrfach wiederkehrende Rondothema nach unterbrechenden Zwischengedanken im Mittelalter; die akkordliche Bindung der zwei Sonatensatz- themen an den Gegensatz TONICA — DOMINANTE in der Klassik; die Ein- führung des die tonale Ausdruckskraft so unerwartet erweiternden Nonakkordes in der Romantik usw.

Die Kompositionstechnik erweist sich so als eine Aufeinanderfolge von musika- lischen Manipulationsschemen.

Es ist deshalb nur natürlich, daß in unserer eben begonnenen technologischen Epoche die Ausdehnung des Prinzips der Reihentechnik auch auf alle Akzidenzien des Tones, den Schwerpunkt auf eine neue Art von Manipulation hin verschiebt. Eine *neue* Art, denn tatsächlich ist an die Stelle der kompositorischen Verwer- tung der früheren „natürlichen Qualitäten“ der musikalischen Materie — wie diese z. B. in den Tonleitern historisch zum Ausdruck gelangt sind — eine zunächst gewissermaßen vom Klange abstrahierende Denkleistung getreten. Dieses völlig neue Verhältnis zur klanglichen Materie kommt darin zum Ausdruck, daß auf der Reihentechnik basierende Kompositionen oft ebenso die „naturgegebenen“ Aus- führungsmöglichkeiten vernachlässigen, wie sie immer mehr der historisch ge- wordenen Ausdruckskräfte der Musik entbehren.

Bei der definitiven Abfassung solcher Kompositionen ist es deshalb äußerst wichtig, durch die uns mögliche klangliche Idealvorstellung noch nachträglich das Gleichgewicht zwischen den vorangegangenen Abstraktionsvorgängen und ihrer abschließenden tönenden Konkretisierung abzurunden.

Manipulation kann Konzeption nicht ersetzen! Konzeption war es z. B., als Beet- hoven gewalttätig Schiller's Ode „An die Freude“ um- und neuformte, verstüm- melte, ja zerriß, um an deren Stelle jene schöpferische Neufassung zu setzen, als die sie heute in unserem Bewußtsein lebend, das Schiller'sche Original fast aus- gelöscht hat.

Schiller's Ode „An die Freude“ hat acht zwölfzeilige Strophen, deren jede aus zwei Teilen besteht: die ersten acht Zeilen definieren in immer neuen und dabei immer „gedanklich blässer“ werdenden Abwandlungen den Begriff der Freude

selbst; die abschließenden vier Zeilen aber fügen jedesmal Aufforderungen und Schlüsse daraus hinzu. Diesen akademisch-traditionellen Zwölfzeileraufbau negiert Beethoven ebenso vollständig wie er alles nur „worthaft geredete“ aus seiner Fassung des Schillerschen Gedichtes ausschließt. Von dessen acht Strophen verwendet Beethoven außer den ersten drei nur noch die abschließenden vier Zeilen der vierten Strophe! (Mehr als die Hälfte des Schillerschen Gedichtes verschwindet also völlig bei Beethoven.)

Man lese Beethovens Neufassung, wie die anschließende Gegenüberstellung seines und des Schillerschen Textes sie aufzeigt. Das ist eine neue Form und Wortgestalt, mehr aber noch ein neuer Geist.

BEETHOVENS UMFORMUNG DER SCHILLERSCHEN ODE „AN DIE FREUDE“

I. Schillers Text

- | | |
|--|--|
| <p>Ia Freude, schöner Götterfunken,
Tochter aus Elysium,
Wir betreten feuertrunken,
Himmlische, dein Heiligtum.
Deine Zauber binden wieder,
Was die Mode streng geteilt,
Alle Menschen werden Brüder,
Wo dein sanfter Flügel weilt.</p> <p>Ib Seid umschlungen, Millionen!
Diesen Kuß der ganzen Welt!
Brüder – überm Sternenzelt
Muß ein lieber Vater wohnen.</p> <p>IIa Wem der große Wurf gelungen,
Eines Freundes Freund zu sein,
Wer ein holdes Weib errungen,
Mische seinen Jubel ein!
Ja – wer auch nur eine Seele
Sein nennt auf dem Erdenrund!
Und wer's nie gekonnt, der stehle
Weinend sich aus diesem Bund.</p> <p>IIb Was den großen Ring bewohnt,
Huldige der Sympathie!
Zu den Sternen leitet sie,
Wo der Unbekannte thronet.</p> <p>IIIa Freude trinken alle Wesen
An den Brüsten der Natur,
Alle Guten, alle Bösen
Folgen ihrer Rosenspur.
Küsse gab sie uns und Reben,
Einen Freund, geprüft im Tod.
Wollust ward dem Wurm gegeben,
Und der Cherub steht vor Gott.</p> <p>IIIb Ihr stürzt nieder, Millionen?
Ahnest du den Schöpfer, Welt?
Such ihn überm Sternenzelt!
Über Sternen muß er wohnen.</p> | <p>IVa Freude heißt die starke Feder
In der ewigen Natur.
Freude, Freude treibt die Räder
In der großen Weltenuhr.
Blumen lockt sie aus den Keimen,
Sonnens aus dem Firmament,
Sphären rollt sie in den Räumen,
Die des Sehers Rohr nicht kennt.</p> <p>IVb Froh, wie seine Sonnen fliegen
Durch des Himmels prächtigen Plan,
Wandelt, Brüder, eure Bahn,
Freudig, wie ein Held zum Siegen.</p> <p>V Aus der Wahrheit Feuerspiegel
Lächelt sie den Forscher an.
Zu der Tugend steilem Hügel
Leitet sie des Dulders Bahn.
Auf des Glaubens Sonnenberge
Sieht man ihre Fahnen wehn,
Durch den Riß gesprengter Särge
Sie im Chor der Engel stehn.
Duldet mutig, Millionen!
Duldet für die bessere Welt!
Droben überm Sternenzelt
Wird ein großer Gott belohnen.</p> <p>VI Göttern kann man nicht vergelten,
Schön ist's ihnen gleich zu sein.
Gram und Armut soll sich melden,
Mit den Frohen sich erfreuen.
Groll und Rache sei vergessen,
Unserm Todfeind sei verziehen,
Keine Träne soll ihn pressen,
Keine Reue nage ihn.
Unser Schuldbuch sei vernichtet!
Ausgesöhnt die ganze Welt!
Brüder – überm Sternenzelt
Richtet Gott, wie wir gerichtet.</p> |
|--|--|

- VII Freude sprudelt in Pokalen,
In der Traube goldnem Blut
Trinken Sanftmut Kannibalen,
Die Verzweiflung Heldenmut.
Brüder, fliegt von euren Sitzen,
Wenn der volle Römer kreist,
Laßt den Schaum zum Himmel spritzen:
Dieses Glas dem guten Geist!
Den der Sterne Wirbel loben,
Den des Seraphs Hymne preist,
Dieses Glas dem guten Geist
Überm Sternenzelt dort oben!

- VIII Festen Mut in schweren Leiden,
Hilfe, wo die Unschuld weint,
Ewigkeit geschwornen Eiden,
Wahrheit gegen Freund und Feind,
Männerstolz vor Königsthronen –
Brüder, gält es Gut und Blut:
Dem Verdienste seine Kronen,
Untergang der Lügenbrut!
Schließt den heiligen Zirkel dichter,
Schwört bei diesem goldnen Wein,
Dem Gelübde treu zu sein,
Schwört es bei dem Sternenrichter!

II. Beethovens Umformung

- | | | |
|---|--|--|
| <p>A Ia Freude, schöner Götterfunken,
Tochter aus Elysium,
Wir betreten feuertrunken,
Himmlische, dein Heiligtum.
Deine Zauber binden wieder,
Was die Mode frech geteilt,
Alle Menschen werden Brüder,
Wo dein sanfter Flügel weilt.</p> <p>IIa Wem der große Wurf gelungen,
Eines Freundes Freund zu sein,
Wer ein holdes Weib errungen,
Mische seinen Jubel ein!
Ja – wer auch nur eine Seele
Sein nennt auf dem Erdenrund!
Und wer's nie gekonnt, der stehle
Weinend sich aus diesem Bund.</p> <p>IIIa Freude trinken alle Wesen
An den Brüsten der Natur,
Alle Guten, alle Bösen
Folgen ihrer Rosenspur.
Küsse gab sie uns und Reben,
Einen Freund, geprüft im Tod.
Wollust ward dem Wurm gegeben,
Und der Cherub steht vor Gott.</p> <p>IVb Froh, wie seine Sonnen fliegen
Durch des Himmels prächtigen Plan,
Wandelt, Brüder, eure Bahn,
Freudig, wie ein Held zum Siegen.</p> <p>Ia Freude, schöner Götterfunken,
Tochter aus Elysium,
Wir betreten feuertrunken,
Himmlische, dein Heiligtum.
Deine Zauber binden wieder,
Was die Mode frech geteilt,
Alle Menschen werden Brüder,
Wo dein sanfter Flügel weilt.</p> | <p>B IIIb Ihr stürzt nieder, Millionen?
Ahnest du den Schöpfer, Welt?
Such ihn überm Sternenzelt!
Über Sternen muß er wohnen.</p> <p>Ib Seid umschlungen, Millionen!
Diesen Kuß der ganzen Welt!
Brüder – überm Sternenzelt
Muß ein lieber Vater wohnen.</p> <p>Ia Freude, schöner Götterfunken,
Tochter aus Elysium,
Wir betreten feuertrunken,
Himmlische, dein Heiligtum.</p> <p>Ib Seid umschlungen, Millionen!
Diesen Kuß der ganzen Welt!</p> <p>IIIb Ihr stürzt nieder, Millionen?
Ahnest du den Schöpfer, Welt?
Such ihn überm Sternenzelt!
Über Sternen muß er wohnen.</p> <p>C Ia Freude, Tochter aus Elysium!
(gekürzt) Deine Zauber binden wieder,
Was die Mode frech geteilt,
Alle Menschen werden Brüder,
Wo dein sanfter Flügel weilt.</p> <p>Ib Seid umschlungen, Millionen!
Diesen Kuß der ganzen Welt!
Brüder, überm Sternenzelt
Muß ein lieber Vater wohnen.</p> <p>Ia Freude, schöner Götterfunken,
(gekürzt) Tochter aus Elysium,
Freude, schöner Götterfunken.</p> | <p>} gleich-
zeitig
ge-
sungen</p> |
|---|--|--|

Bei Schiller schließt die „Ode“ mit dem Wortgeklingel:

„Brüder, fliegt von Euren Sitzen,
wenn der volle Römer kreist;
laßt den Schaum zum Himmel spritzen:
dieses Glas dem guten Geist!“

Bei Beethoven dient das ganze Gedicht nur dazu, die drei, ihm allein wichtigen Grundgedanken auszuprägen:

FREUDE, BRÜDERLICHKEIT, GOTTEGWEISSHEIT.

* * *

Manipulation kann also Konzeption nie ersetzen; denn *Konzeption* ist wesenhafte Neuschau, die aus längst Gekanntem einen neuen Schöpfungsanfang ermöglicht.

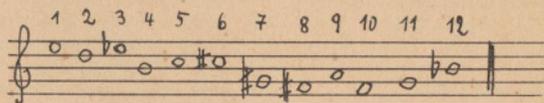
II.

Zur Entwicklung der Serientechnik

VON LUIGI NONO

CHARAKTERISTISCHE ZWÖLFTONREIHEN

1. Arnold Schönberg: a) Serenade, Opus 24, 4. Satz



(Beispiel 3)

Diese Reihe besteht aus folgenden 11 Intervallen:

- 3 kl. Sekunden (d—es, h—c, c—des)
- 3 gr. Sekunden (e—d, gis—fis, f—g)
- 2 kl. Terzen (fis—a, g—b)
- 2 gr. Terzen (dis—h, a—f)
- 1 reine Quart (cis—gis)

Ihr liegt also ein bestimmtes Auswahlprinzip hinsichtlich der verarbeiteten Intervalle zugrunde. Ein solches Auswahlprinzip muß in jeder Serie wirksam sein. Von ihm hängt das individuelle Gesicht der Reihen ab.

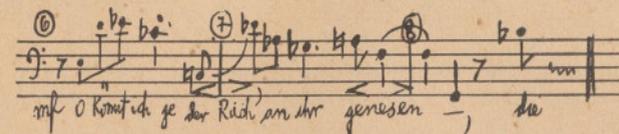
An dieser Reihe wird zugleich die thematische Tendenz verständlich, welche Schönberg mit jeder Serie verbindet.

Sie benötigt noch nicht jene Festsetzung absoluter Tonhöhen (melodisch und akkordisch) für ihre Intervallstruktur, welche den Gebrauch relativer Intervalle ausschließt.



(Beispiel 4)

Die Instrumente stellen die Reihe zweimal nacheinander in der Originalgestalt auf (Takt 1—5). Daran schließt und wiederholt die Gesangsstimme weitere dreizehn Male die Reihe (Takt 6—69).



(Beispiel 5)

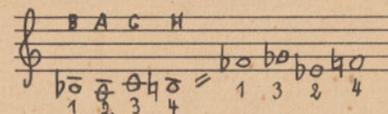
Diese überaus wichtige Reihe bildet die Ausgangslage für die ganze Weiterentwicklung der Serientechnik. Sie entstammt der ersten orchestralen Zwölftonkomposition, die Schönberg veröffentlicht hat.

b) Orchestervariationen, Opus 31



(Beispiel 6)

Das Thema dieser Variationen setzt Schönberg aus den vier Grundformen der Reihentechnik selbst zusammen: Original, Krebs der Umkehr der Reihe, Krebs der Reihe selbst, Umkehrung der Reihe.

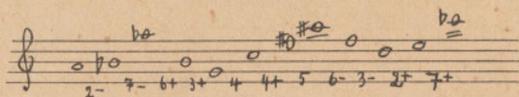


(Beispiel 7)

Die Reihe schließt eine spiegelnde Transponierung der Töne B—A—C—H (als e—fis—es—f) in sich ein (Beispiel 7). Sie enthält also eine unabhängig und vor der

In beiden Sektionen werden eine bestimmte Anzahl von Permutationen (je 36) der sie ausmachenden Töne (c—des—d—es—e—f und ges—g—as—a—b—h) vorgenommen, wobei die Anordnung der ausgewählten Töne zu Intervallen jedesmal wieder in Form einer in zwei Sektionen aufgeteilten Serie erfolgt.

5. Luigi Nono: „Il canto sospeso“



(Beispiel 11)

Die Reihe dieses Werkes verwendet alle 11 Intervalle von der kleinen Sekunde bis zur großen Septime. Die vier Grundformen werden hier nicht mehr benötigt, da die vollzogene Auswahl der Töne auch in Hinsicht auf den Rhythmus, die Dynamik und die Klanghöhen, die Grundreihe in ihren Intervallen selbst gestaltet.

III.

Brief an eine unbekante Adresse

VON HANS WERNER HENZE

Noch immer (und hoffentlich noch für sehr lange) im Werden, im Entwickeln, muß man recht vorsichtig sein mit Voraussagungen und Feststellungen. Ein Ausdrucksmittel, soeben gefunden, kann morgen schon eine Banalität geworden sein, eben dann, wenn viele sich seiner bedienen. Es ist eine Frage, die sich jeder persönlich beantworten muß, ob man in Gruppen aufzutreten liebt, oder ob man es vorzieht, allein, und mit eigener Unruhe, Kälte, und mit eigener Sorge die eigene Verantwortung zu tragen. Wo das Geheimnis aufhört, wo alles praktisch geworden ist und somit verdrießlich, hört auch das Leben der Musik auf. Auch ist es nicht wahrscheinlich, daß mystische Verdunklung und Algebra einen neuen Akzent auf die gemeinplätzig gewordenen Formeln setzen können. Die Formel hört man doch immer wieder durch, und Müdigkeit ist der einzige Effekt, der hervorgerufen wird. *Freiheit, wilder und schöner neuer Klang kann nur durch das Gefühl von Freiheit und Übermut entstehen, durch das (so ganz verlorengegangene) Glänzen des Wagnisses.*

Vielleicht muß man dem tauben Applaus der „Intelligenzschicht“ mißtrauen.

Und vielleicht steht viel Neues bevor, vielleicht schon morgen tritt es in Erscheinung, bäurisch und hilflos wie alles was neu ist in der Kunst, ganz ohne Perfektion und ohne Hochmut, aber robust und freigiebig. Da würden die harten, verächtlichen Worte von hohen elfenbeinernen Türmen herabkommen aber ohne Wirkung, und auch ein Bannfluch würde da gar nichts ausrichten. *Wer weiß — viel-*

leicht kommt es wieder einmal so, daß ein „Volkstümliches“ Publikum sich interessiert, das gar nichts von der Anwesenheit moderner Musik wußte, weil diese sich an kein Publikum richtete. Vielleicht daß Bescheidenheit und Liebe es erschienen, Ohr und Herz von Vielen, die unbeachtet sind, einer neuen Musik zuzuwenden. Und daß ein solches Hinwenden der Würde des Musikers nicht abträglich ist. Freilich mag vieles dazu gehören, außer Arbeit und Können auch der ehrliche Glaube an solche Möglichkeit, und, wenn es gestattet ist, ein Etwas, das man nicht erklären kann, ein sechster Sinn, ein Gefühl der Lösung, der Erhebung, der Freude. Das, was man nennt „etwas von Musik verstehen“.

Wenn etwas sehr leise ist, muß es deswegen noch keine kleine Revolution sein, aber es muß auch nicht alles was anders ist, gleich als Revolution gefeiert werden.

Nichts ist unabänderlich, das Schöne und Wunderbare in der Musik besteht nur in der Möglichkeit von Verwandlung, von Abenteuer, von Annäherung an Unge-wisses vor sich im Dunkel, oder in sehr hellem Licht. Wenn plötzlich der Klang von zwei Waldhörnern eine andere Bedeutung annimmt, wenn die „Assoziation“ sich paralyisiert, aus vergilbtem Papier wird ein grünes Olivenblatt, nichts was „schon mal da war“ ist noch da oder war schon mal da, das verdrossene Notenschreiben wird leicht und frei von „System“ — das könnte ein Augenblick sein, wo man eigenhändig die Tür hinter sich schließt, leise, um nicht zu stören, denn man möchte ja ungestört sein, und allein . . . und man geht weit fort.

Vom Wesen der Musik

das moderne Musikempfinden DM 12,80

Musik für jedermann

dem unbekanntem Radiohörer gewidmet . . . DM 10,80

Zwei Bücher von Hermann Scherchen

„Düsseldorfer Nachrichten“ vom 29. 12. 1955:

Beide Bücher sind in ihrer technischen Präzision und ihrer pädagogischen Eigenschaft für unsere Zeit wie geschaffen.“

BOSSE-MUSIKBÜCHER REGENSBURG

Über die Raumakustik im großen Konzert- und Sendesaal des Hessischen Rundfunks in Frankfurt/M.

VON KARLHANS WEISSE

Der Architekt Gerhard Weber und der Verfasser als freischaffender Akustik-Ingenieur standen 1952 vor der Aufgabe, für den Hessischen Rundfunk einen Saal zu projektieren, der dessen Bedürfnissen nach einem großen Aufnahme- und Sendestudio dienen und gleichzeitig als Konzert- und Festsaal für öffentliche Veranstaltungen mit Publikum geeignet sein sollte.

Ein Orchesterpodium sollte Platz für etwa 150 Musiker mit Instrumenten und bis zu 300 Chormitgliedern bieten, der Zuhörerteil sollte etwa 1200 bequeme Sitzplätze fassen, ein Besucherbalkon war aus internen Gründen unerwünscht. Der Raum für eine später einzubauende Konzertorgel war vorzusehen.

Mit diesen Forderungen war der Platzbedarf für die Grundfläche weitgehend festgelegt. Im Vorentwurf von Architekt Weber wurden für das Orchesterpodium bei einer Tiefe von etwa 16 m im Mittel etwa 20 m Breite benötigt, für die Gesamt-Saal-Länge ergaben sich rund 50 m, als größte Saalbreite rund 32 m. Die Saalhöhe sollte nach akustischen Gesichtspunkten bestimmt werden.

I.

Für jeden Zuhörerraum gelten grundsätzlich die Bedingungen, daß kein Echo in ihm entstehen darf und daß seine Nachhallzeiten innerhalb gewisser Erfahrungswerte liegen müssen.

Als „Echo“ werden Schallrückwürfe bezeichnet, die von dem menschlichen Ohr als deutliche Wiederholung des vorangegangenen, gewöhnlich des Originalschalles, wahrgenommen werden können. Hierzu benötigt das menschliche Ohr einen Zeitunterschied von $\frac{1}{20}$ Sekunde oder mehr. Schneller aufeinander folgende Schallrückwürfe im Raum werden als (meist erwünschter) zusammenhängender Nachhall empfunden. Dem Zeitunterschied von $\frac{1}{20}$ Sekunde entspricht ein Schallweg-Unterschied (Schallumweg) von 17 m.

Selbstverständlich entstehen in jedem größeren Raum auch sehr viel längere Schallumwege als 17 m. Zur Verhütung eines Echos ist es aber nur erforderlich, dafür zu sorgen, daß die kürzestmöglichen Schallumwege zwischen dem direkten Schall und seinen unmittelbar nachfolgenden Rückwürfen und zwischen allen weiteren Rückwürfen untereinander innerhalb der 17-m-Grenze bleiben.

Diese Forderung zwang zu einer für den großen Raum verhältnismäßig sehr niedrigen Raumhöhe von etwa 7 bis 11 m über dem Orchesterpodium, Chor und den vorderen Zuhörerplätzen, weil ein besonderer sichtbarer Schallspiegel über dem Orchester, etwa wie in der „Royal-Festival-Hall“, vermieden werden sollte.

Gegen die niedrige Raumhöhe von nur 11 m an der höchsten Stelle des Saales wurden von namhaften Fachleuten ernste Bedenken geäußert: von Akustik-In-

genieuren mit dem Hinweis, daß kein Saal mit einem so ungewöhnlichen Längen:Breiten:Höhen-Verhältnis und auch nur einigermaßen annehmbarer Akustik bekannt sei, von Toningenieuren, daß eine zu niedrige Raumhöhe die „Tonentfaltung“ behindere. (Abb. 1)

Auch die Frage der günstigsten Nachhallzeiten ist allgemein etwas umstritten, nicht nur bei diesem Bauwerk. Zu allem Übel sind die Nachhallzeiten auch noch

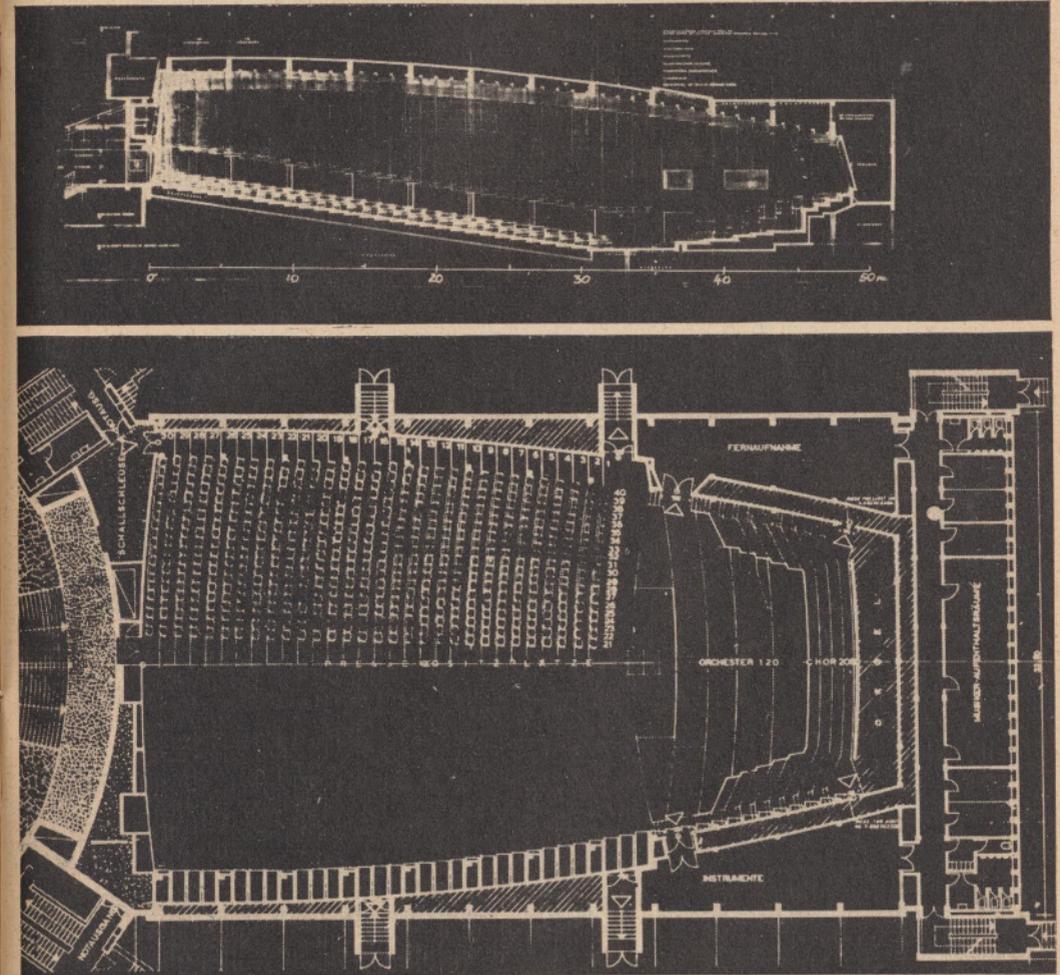


Abb. 1 Grundriß und Längsschnitt des großen Frankfurter Konzert- und Sendesaales



Abb. 2 Innenansicht des Saales vom Besucher-Eingang aus

(innerhalb gewisser Grenzen) vom Zeitgeschmack abhängig, sozusagen von der jeweiligen „Mode“ auf diesem Gebiet. Während früher sehr „trockene“ Studios mit kurzen Nachhallzeiten beliebt waren, bevorzugen heute Musiker und Tonmeister etwas halligere Aufnahme- und Senderäume: Neben angenehm warmer Tonfülle, bedingt durch längere Nachhallzeiten, wird gleichzeitig gute „Definition“ der Einzeltöne (mit kürzeren Nachhallzeiten) verlangt.

Die technische Lösung eines so repräsentativen Einzelfalles schien also nur mit einer gewissen Veränderlichkeit der Akustik möglich, die eine Feinabstimmung nach dem Gehör erlaubt. Da ich aber in meiner bisher 20-jährigen Praxis noch keine veränderliche Akustik angetroffen habe, die ästhetisch, mechanisch und akustisch befriedigt hätte, wurde hier eine tondurchlässige optische Verkleidung, unabhängig von den dahinter anzubringenden Schall-Absorptions- und Reflexions-Flächen, vorgesehen. Eine solche Anordnung hat grundlegende Vorteile: Nachhallzeiten und Diffusitätsmaß der Rückwürfe lassen sich unabhängig von einander (und praktisch ohne Betriebskosten) einregulieren, ohne an dem optischen Bild des Saales das geringste zu verändern, außerdem werden Willkür-Aussagen von Seiten der Beurteiler bei der Feinabstimmung ausgeschlossen, weil die Beurteiler nicht sehen können, welche „Einstellung“ sie gerade abhören, aber genau wissen, daß die Rekonstruierbarkeit ihrer Werturteile geprüft werden kann.

II.

Die Frage nach der günstigsten Zeitfolge von direktem Schall und unmittelbar nachfolgenden Wand-, Decken- usw. Rückwürfen ist im Grunde die Frage nach der günstigsten Raumform. (Echos sind Primärreflexionen mit zu großen Verzögerungen — Räume mit Echos haben „ungünstige Raumformen“.)

Der Klang eines Raumes setzt sich aus den Eigenschaften des direkten Schalles und dessen Rückwürfen an den Raumbegrenzungen zusammen. Der direkte Schall ist natürlich unmittelbar von Art und Qualität des Tonerzeugers abhängig, während das Mitklingen des Raumes von Abmessungen, Formen und Werkstoffen seiner Schallrückwurf-Flächen, gewöhnlich also seiner Wände, Decken und Böden abhängt.

Die Rückwürfe scheinen beim Zuhörer über das Sinnesorgan „Ohr“ zwei verschiedene „Gemütsbewegungen“ hervorzurufen: Die dem direkten Schall nachfolgenden Primärreflexionen bewirken das mehr oder minder angenehme Anklingen oder Einschwingen des Raumes, bei der Orgel zum Beispiel „Tonansprache“ genannt, die später nachfolgenden Rückwürfe, die in ihrer Gesamtheit den Nachhall ausmachen, sind als Abklingvorgang des Raumes aufzufassen, bei einem Flügel etwa dem Pedal entsprechend.

Weder die Primärreflexionen noch die Nachhallrückwürfe sind unübersehbar oder gar regellos. Die Primärreflexionen lassen sich zeichnerisch mit beliebiger Genauigkeit konstruieren, der Nachhall mit Hilfe der genialen Sabine'schen Formel mit ausreichender Genauigkeit berechnen.

In jedem rechtwinkligen Raum entsprechend dem Beispiel der Abb. 3 treffen nach dem direkten Schall vom Sender S bei dem Empfänger E 17 Rückwürfe von den Begrenzungsflächen des Raumes (h=hinten, o=oben, r=rechts, l=links und u=unten) und deren Kombinationen mit je einem Stück Wellenfront, d. h. einem

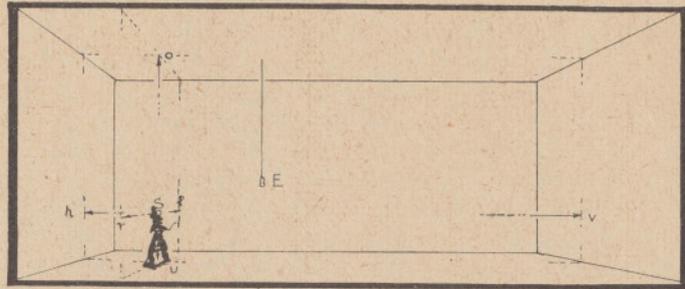


Abb. 3 Schema eines Rechteck-Raumes mit seinen 5 Primär-Rückwurf-Flächen. (Zwischen Sender S und Empfänger E entstehen 17 Primär-Reflexionen)

genau meßbaren Reflexions-Schallreiz, ein, bevor oder während Rückwürfe von der Vorderwand v und Mehrfach-Rückwürfe zwischen Boden und Decke einerseits und den Seitenwänden andererseits den Empfänger E erreichen. Da sich Rückwürfe aus senkrecht aufeinanderstoßenden ebenen Flächen nahtlos schließen, braucht gar nicht untersucht zu werden, ob z. B. bei dem Zweifach-Rückwurf Wand-Decke r-o erst r und dann o vom direkten Schall getroffen wurde. Die bei E eintreffende Reflexions-Wellenfront r-o ist identisch mit o-r usw.

Die im rechtwinkligen Raum dem direkten Schall nachfolgenden Rückwürfe ergeben sich wie folgt:

nach einmaligem Auftreffen an 5 Wandflächen } o, r, u, l und h

o-r = r-o

o-l = l-o

o-h = h-o

nach zweimaligem Auftreffen diesseits und jenseits von 8 Kanten

r-u = u-r

r-h = h-r

u-l = l-u

u-h = h-u

l-h = h-l

nach dreimaligem Auftreffen um die 4 Eckpunkte

o-r-h = o-h-r = r-o-h = r-h-o = h-o-r = h-r-o

o-l-h = o-h-l = l-o-h = l-h-o = h-o-l = h-l-o

u-r-h = u-h-r = r-u-h = r-h-u = h-u-r = h-r-u

u-l-h = u-h-l = l-u-h = l-h-u = h-u-l = h-l-u

Die zeitliche Reihenfolge der vorstehenden Rückwürfe richtet sich nach Raumbreite und Höhe und nach der Stellung der Schallquelle innerhalb der Rückwurf-flächen. Die Längen der Wegunterschiede verschieben sich für die Zuhörer geringfügig, aber gesetzmäßig, worauf hier nicht näher eingegangen werden kann.

Wen diese geometrischen Gesetzmäßigkeiten überraschen, der möge sich klar machen, daß aus einem räumlichen Winkel, bestehend z. B. aus dem Boden und zwei Wänden, Abb. 4, dem direkten Schall stets 7 Rückwürfe, keiner mehr und

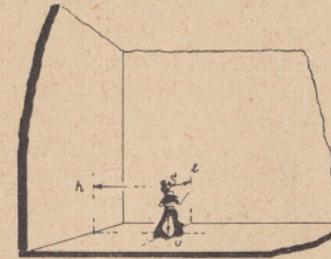


Abb. 4 Schema einer räumlichen Ecke mit 3 Primär-Rückwurf-Flächen. (Dem direkten Schall von S folgen immer 7 Primär-Reflexionen.)

keiner weniger, nachfolgen müssen. Der räumliche rechte Winkel mit seinem Scheitel im Kugelmittelpunkt schneidet aus der Kugel $\frac{1}{8}$ heraus. Da von einer kugelförmigen Schallwellenfront nichts verloren gehen kann, müssen also sieben Stück Kugel-Oberflächenteile von je etwa $\frac{1}{8}$ Größe dem direkten Schall nachfolgen.

Diese 7 Wellenfronten mit den der Abb. 3 entsprechenden Bezeichnungen sind:

nach einmaligem Auftreffen } l, h und u

nach zweimaligem Auftreffen } l-h = h-l
l-u = u-l
h-u = u-h

nach dreimaligem Auftreffen } l-h-u = l-u-h = h-l-u = h-u-l = u-l-h = u-h-l

In Wirklichkeit gibt es aber keine so einfachen quaderförmigen Räume wie in unserem Beispiel der Abb. 3. In Wirklichkeit fällt stets für die Zuhörerschaft eine mehr oder minder große Anzahl der 17 Primärwellenfronten aus, in Wirklichkeit kann man die hier als einmaligen Impuls gedachten Wellenfronten durch diffus reflektierende (stark gegliederte) Rückwurf-flächen auflockern, damit die Anzahl der Rückwurf-Schallreize am Beobachtungsort vermehren und ihre Intensität je Rückwurf herabsetzen.

Man erkennt aus diesen Überlegungen den Irrweg der Fragestellung nach mehr oder minder günstigen Längen : Breiten : Höhen-Verhältnissen eines Raumes. Die entscheidende Fragestellung müßte sich statt dessen auf erprobte Erkenntnisse hinsichtlich psychologisch günstiger Zeitfolgen und Intensitätsverhältnisse der Primärreflexionen richten, von denen wir bisher nur die sehr dürftige äußerste Grenze „kein Schallumweg ≤ 17 m“ kennen. Aus solchen Erkenntnissen ließen sich dann sehr wahrscheinlich sogar einige allgemein gültige „akustisch günstigste Raumformen“ ableiten, zeitgemäß etwa den Regeln entsprechend, die Vitruvius für griechisch-römische Freilicht-Theater vor ungefähr 2000 Jahren aufgestellt

hat. Solche Erkenntnisse würden zweifellos erlauben, anlässlich einer bestimmten Bauaufgabe dem Architekten für die Raumgestaltung mehrere akustisch gleichwertige, räumlich aber sehr unterschiedliche Möglichkeiten einräumen zu können. Solche Erkenntnisse fehlen aber bisher trotz langjähriger großer Bemühungen noch immer.

Anhaltspunkte über günstige Primärreflexionen bei der Planung dieses Saales lieferten zeichnerische Untersuchungen über die geometrische Schallverteilung in der ehemaligen Berliner Philharmonie und dem Gewandhausaal Leipzig, beides durch Kriegseinwirkung zerstörte Räume mit ehemals anerkannt guter Akustik. Aus diesen ging übereinstimmend mit Oszillogrammen in der Jesus-Christus-Kirche, Berlin, hervor, daß bei diesen Räumen kürzeste Schallumwege von nur 12 m nicht überschritten werden. (Diese Schallumwege betragen an dem inzwischen von den Tonmeistern für Ein-Mikrofon-Aufnahmen nach Gehör im Saal gewählten Platz nur ungefähr 7 m.)

Anders als bei den historischen Vorbildern mußte aber bei diesem Neubau die Saaldecke den überwiegenden Anteil an erwünschten Rückwürfen liefern; wegen der großen Raumbreite verloren die Seitenwände als Rückwurfflächen für den Zuhörer fast vollkommen an Bedeutung. Namentlich den Seitenwänden des Orchester-Podiums konnte deshalb eine andere außerordentlich wichtige Aufgabe zugewiesen werden: den Orchestermittgliedern ihre eigene und die Musik ihrer Mitspieler angenehm und sehr genau zu Gehör zu bringen. Zu diesem Zweck wurden die Orchester-Seitenwände in Elementen von je etwa 1 m Breite entgegen der herrschenden Lehrmeinung paarweise parallel gestellt, eine Maßnahme, die sich bisher vorzüglich bewährt hat.

Besondere Kopfschmerzen hat mir die häufig und mit Nachdruck wiederholte Forderung der Tonmeister und Toningenieur nach größerer Raumhöhe zur besseren „Tonentfaltung“ bereitet.

Das verlangte Höherlegen der Saaldecke um einige Meter war ausgeschlossen, weil sich dann an bestimmten Plätzen im Saal ein Echo gebildet hätte. Andererseits aber kann so ein Hinweis, der auf Grund langjähriger Rundfunkerfahrung mit Überzeugung vorgetragen wird, nicht leichtfertig übergangen werden, auch wenn die betreffenden Argumente in diesem speziellen Einzelfall zweifellos sachlich falsch waren. Wo aber lag das objektive Körnchen Wahrheit?

Um den Wunsch nach größeren Laufzeit-Unterschieden zwischen dem direkten Schall und den Primärreflexionen konnte es sich nicht handeln, diese waren sicher lang genug. Vielleicht aber ist es für einen musikalisch ästhetisch befriedigenden Klangeindruck notwendig, die Summe der Primärreflexionen auf ein gewisses Maß auseinander zu ziehen — wie bei älteren Räumen geringerer Breiten durch die gewöhnlich zuerst einsetzenden Seitenwand-Rückwürfe, denen dann erst die Decken und Wand-Decken-Rückwürfe folgen? Vielleicht wünscht das Ohr auch nur analog zu den sichtbaren Raumabmessungen einen akustischen Eindruck größerer Entfernungen wahrzunehmen? Wir wissen es bis heute nicht.

Um beiden Möglichkeiten Rechnung zu tragen wurde die Saaldecke mit ihren

meterhohen Betonbindern hinter der schalldurchlässigen Holzstäbchen-Verkleidung zur Erzeugung stark diffuser Reflexionen ausgenützt und überdies im Längs- und Querschnitt leicht gekrümmt ($r_L \approx 170 \text{ m}$, $r_Q \approx 85 \text{ m}$). Durch die ungewöhnlich starke Gliederung der Betonkonstruktion werden die Deckenrückwürfe für die Zuhörerschaft zeitlich und räumlich erheblich auseinander gezogen; durch Gliederung und Krümmung werden die Rückwurf-Wellenfronten flacher als bei einer gleich weit entfernten ebenen Deckenfläche. Hierdurch entsteht für die Zuhörer und das Mikrofon nach dem Huyghens'schen Prinzip der Eindruck einer größeren Entfernung von der Rückwurffläche¹⁾ — im vorliegenden Falle der einer um 2 bis 4 m höher liegenden Raumdecke. Das Ohr ist für solche akustische Täuschungen noch empfänglicher als das Auge für optische, das z. B. auch (innerhalb gewisser Grenzen) bereit ist, an längs- oder quer-gestreiften Pullovern nach dem Wunsch der Trägerin „Schlankheit“ oder „Üppigkeit“ wahrzunehmen.

Zum Thema der geometrischen Rückwürfe sei schließlich erwähnt, daß für die vom Orchester entferntesten Zuhörerplätze im Saal mit Rücksicht auf seine Länge von 50 m besondere Schall-Spiegel angebracht worden sind. Diese bewirken für die hinteren Zuhörerplätze eine allgemein bestätigte auffällige Brillanz des Orchesterklanges. Die Schallspiegel werden aus der Holzverkleidung des vorläufig unbenutzten Orgelraumes, der Brüstung der Sängerpore aus Plexiglas und 4 m breiten Sperrholzplatten an der Saaldecke hinter der Stäbchenverkleidung gebildet.

Die Frage der günstigsten Nachhallzeiten in Abhängigkeit von Frequenz und Raumgröße ist weniger unsicher, dennoch aber nicht weniger lebhaft umstritten.²⁾

Auf Grund eigener Sender-Erfahrungen und nach Beratung mit den Toningenieurern des Senders RIAS Berlin wurden schließlich unter allgemeiner Billigung als anzustrebende Mittelwerte in einem möglichst breiten Frequenzbereich

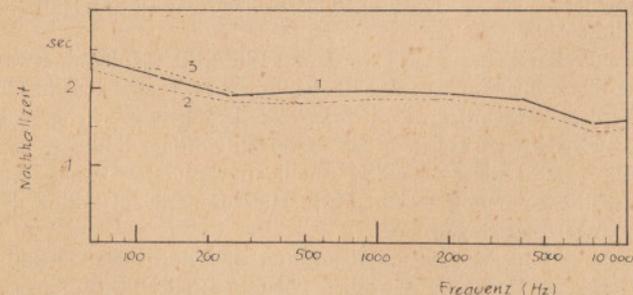


Abb. 5 Nachhallzeiten im Frankfurter Sendesaal im derzeitigen Gebrauchszustand.

- 1 am üblichen Platz für Einmikrofon-Aufnahmen und Sendungen
- 2 im Zuhörerteil vorn
- 3 im Zuhörerteil, Saalmitte und hinten

1) L. Cremer. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik (1948), Band 1 § 46. S. Hirzel-Verlag, Stuttgart
 2) W. Kuhl. Über Versuche zur Ermittlung der günstigsten Nachhallzeit großer Musikstudios. Akustische Beihefte (1954) S. 618 ff

2,0 Sekunden mit Über- und Unterschreitungs-Möglichkeiten von 0,1 bis 0,2 s vorgesehen.

Die nach Einregulierung für den Gebrauchszustand des Saales tatsächlich erreichten Nachhallzeiten für Sendemikrofon und Zuhörer zeigt Abb. 5, die Veränderungsmöglichkeiten am Mikrofonplatz durch einfaches Drehen der im folgenden näher beschriebenen Schallschluck-Körper, Abb. 6. Durch Zurückschieben

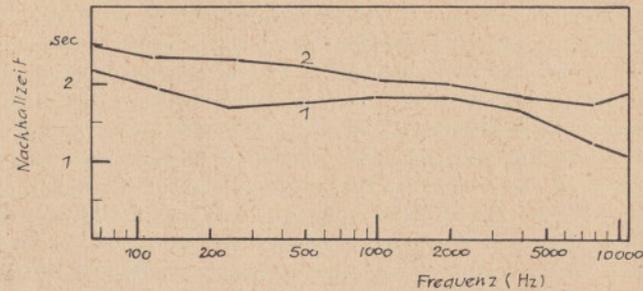


Abb. 6 Veränderungsmöglichkeit der Nachhallzeiten am Mikrofon-Platz durch Drehen der Schallschluck-Körper.

1 Minimalwerte, 2 Maximalwerte

der Schallschluck-Körper gegenüber ihrer jetzigen Gebrauchsstellung lassen sich die Minimalwerte der Abb. 6 noch unterschreiten, durch Vorschieben die Maximalwerte etwas steigern. Beides ist nach den bisher vorliegenden Erfahrungen nicht nötig.

Die Nachhallberechnungen sind im Grunde genommen nicht besonders schwierig. Die Anteile der einzelnen Absorptions-Elemente an der Gesamt-Absorption veranschaulicht Abb. 7.

Das Gesamtvolumen des Saales wurde mit Rücksicht auf die ab etwa 2000 Hz einsetzende Luftabsorption, auf die mit baulichen Maßnahmen kein Einfluß genommen werden kann, mit etwa 10 cbm/Platz als angemessen angesehen.

Einige Schwierigkeiten bereitete das Einsetzen richtiger Schluckgrade für den flächenmäßig weitaus überwiegenden Anteil an verputzten Wand- und unverputzten gestrichenen Beton-Deckenflächen. Hierauf wird am Schluß dieses Abschnittes noch genauer eingegangen.

Der Hauptanteil an der Gesamt-Absorption wird durch das Gestühl bewirkt, dessen Schluckgrade durch die Art seiner Polsterung und Bespannungstoffe den Werten für Publikum³⁾ so genau wie möglich angenähert wurden. Durch diese von der Besetzung des Saales mit Zuhörern unabhängige Akustik finden Übungen und Aufnahmen des Orchesters stets unter den gleichen akustischen Bedingungen statt, die auch bei öffentlichen Konzerten mit Publikum herrschen.

Bei den bisher genannten Schallschluck-Elementen, der Luft-Absorption, den

3) E. Meyer und V. Jordan. Nachhallzeiten von Konzerträumen und Schallschluckung der Zuhörer-schaft E. N. T. 7 (1935)

Beton- und Putzflächen und dem Gestühl ist die Absorption für hohe Töne groß, für tiefe dagegen gering. Zur Herstellung einigermaßen gleicher Nachhallzeiten sind deshalb besondere Tiefen-Schallschlucker erforderlich, wofür gewöhnlich mit-schwingende Paneele oder besondere Resonatoren verwendet werden.

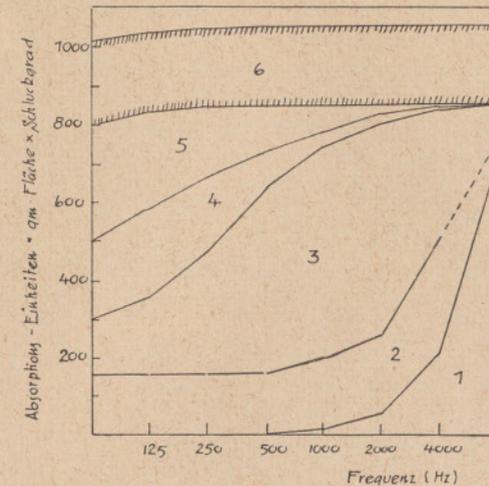


Abb. 7 Anteile aller Schallschluck-Elemente an der Gesamt-Absorption.

1 Luftabsorption, 2 Putz- und Beton-Flächen, namentlich der Decken-Unterschicht, 3 Gestühl mit und ohne Besetzung, 4 Holzpaneele, Rigips, Türen und Fenster, 5 Zu- und Abluft-Öffnungen und Rückwand-Nischen, 6 Veränderungsmöglichkeit durch besondere Schallschluck-Körper

Größte Aufmerksamkeit mußte im vorliegenden Falle natürlich dem Verhalten der aus Holzstäbchen bestehenden tondurchlässigen optischen Verkleidung gewidmet werden, denn selbst ein prozentual geringer Irrtum über die Schluckgrade der Holzstäbchen hätte wegen deren erheblicher Quadratmeter-Mengen alle Berechnungen über den Haufen werfen können. Die vorausgesetzte schalltechnische Neutralität der Holzstäbchen-Verkleidung mußte deshalb an Modellstücken durch sorgfältige Schluckgradmessungen im Hallraum und oszillographische Reflexions-Messungen im Freien untersucht werden. Die Holzstäbchen entsprachen aber erfreulicherweise den an sie gerichteten Erwartungen; ihre eigene Absorption ist vernachlässigbar klein.

Nichtsdestoweniger aber bestimmen gerade sie in Verbindung mit der „quasi-indirekten“ Beleuchtung maßgeblich das festliche Gesicht des Saales. Da ihre handwerkliche Ausführung durch eine Stuttgarter Firma über jede Kritik erhaben ist, bietet der Saal nach nunmehr einjähriger sehr intensiver Benutzung (auch durch das Fernsehen) noch immer den gleichen gepflegten Anblick wie am Eröffnungstage.

Sichtbare Holzpaneelflächen wurden von Architekt Weber, auch unter Berücksichtigung ihrer Herstellungskosten, auf die am stärksten beanspruchten Wandflächen

der seitlichen Saalzugänge für Publikum beschränkt. Als weitere mitschwingende Flächen zur Absorption tiefer Töne dienen Rigips-Verkleidungen an den schon genannten parallel reflektierenden Seitenwänden des Orchesters und an der Saalrückwand bis auf etwa 3 m Höhe über dem Boden. Bei den Orchester-Seitenwänden war wegen deren Gliederung keine nennenswerte Spachtelarbeit erforderlich, an der Saalrückwand können die verspachtelten Rigipsflächen hinter der Stäbchenverkleidung auch einem Baufachmann als fugenlose Fläche erscheinen.

Alle Luftpolster hinter den mitschwingenden Flächen sind ungedämpft, d. h. nicht mit porösem schallschluckendem Material ausgefüllt. Hierdurch ist deren Absorption je Flächeneinheit zwar geringer als mit Hinterfüllung, dafür aber wesentlich gleichmäßiger. Ihre akustische Wirkung kommt insofern dem „Holzcharakter“ historischer Räume sehr nahe. Der Preisunterschied zwischen 50% Putzfläche + 50% Rigipsverkleidung mit Hinterfüllung gegenüber 100% mitschwingender Rigipsverkleidung ohne Ausfüllung des Luftpolsters liegt in der Größenordnung von etwa 1 DM/qm, fällt also selbst bei einem kleineren Bauvorhaben überhaupt nicht ins Gewicht.

Auch die in allen neuzeitlichen Bauwerken benötigten Zu- und Abluft-Öffnungen — hier für die Vollklimatisierung — beeinflussen die Gesamtabsorption und damit die Nachhallzeiten. Sie wirken als Resonatoren, deren Maximalabsorption allgemein von ihrem Resonatoren-Volumen, ihrem Halsquerschnitt und der Halslänge (die auch null werden kann) abhängt. (Bei gleichen Volumina und Halslängen und wachsendem Halsquerschnitt verschiebt sich ihre Maximalabsorption zu höheren, anderenfalls zu tieferen Frequenzen). Da die Absorption von Resonatoren je Halsquerschnitt-Flächeneinheit in der Größenordnung von 1000% (tausend Prozent) liegen kann, ist es natürlich nicht ratsam, sie etwa bei den Nachhallberechnungen zu vernachlässigen, obwohl die anteiligen Resonatoren-Volumina oft etwas schwierig zu erfassen sind. Die Richtung des Luftstromes hat auf die Schluckgrade ihrer Öffnungen zweifellos keinen nennenswerten Einfluß.

Die Bedeutung dieser Öffnungen für die Akustik des Rundfunksaales kam durch Zufall sehr anschaulich zum Ausdruck: Bei den Nachhallmessungen im fast fertigen Raum, dem lediglich die Luftaustrittsverkleidungen fehlten, ergab sich ein verdrießlicher Einbruch in die Nachhallzeit-Kurve im Bereich um 200 Hz. Dieser Einbruch verschwand nach Anbringen der vorgesehenen Blechverkleidungen, durch die die Querschnitte der Resonatorhalse gegenüber den Rohbauöffnungen erheblich verringert wurden und hierdurch ihre Maximalabsorption in den Bereich tieferer Frequenzen absank.

Auch die Bedeutung von Theaterlogen ist unter diesem Gesichtspunkt bisher wenig beachtet worden. Diese können nicht nur zur Herstellung mehr oder minder diffuser Schallrückwürfe, sondern als halslose Resonatoren auch zur Absorption tiefer Frequenzen unter 100 Hz angesetzt werden. Solche Logen ergaben sich hier an der Saalrückwand über den Schallschleusen zum Foyer hinter der tondurchlässigen Stäbchenverkleidung. Um die Diffusitätsmaße ihrer Rückwürfe verändern zu können, wurden sie mittig durch beiderseits glatte Türblätter (aus ein-

fachen Dachlattenrahmen mit Rigipsplatten) unterteilt, die sich um eine vertikale Mittelachse bis auf etwa 45° gegenüber der Wandflucht von Hand verstellen lassen, Abb. 8. Da der Längsschnitt in Abb. 1 nicht durch diese Logen, sondern durch

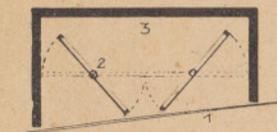


Abb. 8 Rückwandnische mit Drehtüren.
1 Holzstäbchen-Verkleidung, 2 senkrechte Drehachse,
3 verputztes Mauerwerk mit sehr glattem Anstrich

den kleinen Filmvorführungsraum an der Saalrückwand gelegt worden ist, läßt sich aus dieser Zeichnung nicht erkennen, daß außer von der Wand des Vorführungsraumes kein Schallrückwurf von der Saalrückwand Zuhörerschaft oder Mikrofon unmittelbar erreichen kann. Jeder gewöhnliche Rückwand-Rückwurf gelangt nur auf dem Umweg über die stark gegliederte Deckenfläche an das Mikrofon oder zum Publikum. Dennoch wurde von Seiten der Tonmeister der Wunsch nach noch weniger ausgeprägten Rückwand-Reflexionen geäußert und daraufhin die Drehtüren zum Saal hin schräg gestellt; der Effekt befriedigte.

Aber obwohl die Drehtüren selbst ebenso wie die dahinterliegenden Wandflächen der Rückwand-Nischen fast spiegelglatt gestrichen sind, bewirkte diese Schrägstellung eine merkbliche Verkürzung der Nachhallzeiten im Bereich zwischen 100 bis 500 Hz. Ich glaubte zunächst an eine Fehlmessung, sorgfältige Kontrollen bestätigten aber die Beobachtung. Die nachträgliche Erklärung war nicht schwierig: Durch die Schrägstellung der Drehtüren wurden bei gleichbleibendem Luftraum zwischen Türblättern und Nischenrückwand die Öffnungen als Resonatorhalse erheblich vergrößert und hierdurch die Maximalabsorption in den Bereich höherer Frequenzen verschoben. Die ungewöhnliche Breite des Absorptionsbereiches erklärt sich aus den sehr unterschiedlichen Nischenbreiten und Tiefen. Ich bin übrigens nicht sicher, ob von Seiten der Tontechnik diese Veränderung der Absorption oder die ebenfalls nachweisbare Nivellierung der geometrischen Decken-Rückwand-Reflexionen als Haupteffekt bewertet wird.

Kleinere Ungenauigkeiten im Nachhallzeit-Verlauf werden durch die bereits erwähnten besonderen Schallschluck-Körper ausgeglichen, deren eine Seite stark, die andere sehr geringfügig schallschluckend wirken. Diese Körper hängen auf zwei nur intern zugänglichen Seitenbalkonen hinter der tondurchlässigen Stäbchenverkleidung oberhalb der Saalzugänge für Publikum, vergl. den Querschnitt Abb. 9. Es sind insgesamt 48 Tafeln von etwa 1 m Breite, die vom Boden der Balkonplatte bis zur Saaldecke reichen und durch gefaltete Stahlblechrahmen zusammengehalten werden. Diese Tafeln hängen an je einem kräftigen Drehzapfen und können um ihre senkrechte Mittelachse gedreht und an dem Zapfen senkrecht zur Stäbchenverkleidung nahezu um die gesamte Balkonbreite hin-und-her-geschoben werden. Auch leichtes Neigen um etwa 10° nach beiden Seiten ist möglich, bisher aber noch nie angewendet worden.

Ihre Gesamtfläche beträgt 210 qm, die Abwicklung der Deckenfläche vergleichsweise etwa 2500 qm. Bei einer insgesamt erforderlichen Mindest-Absorption von

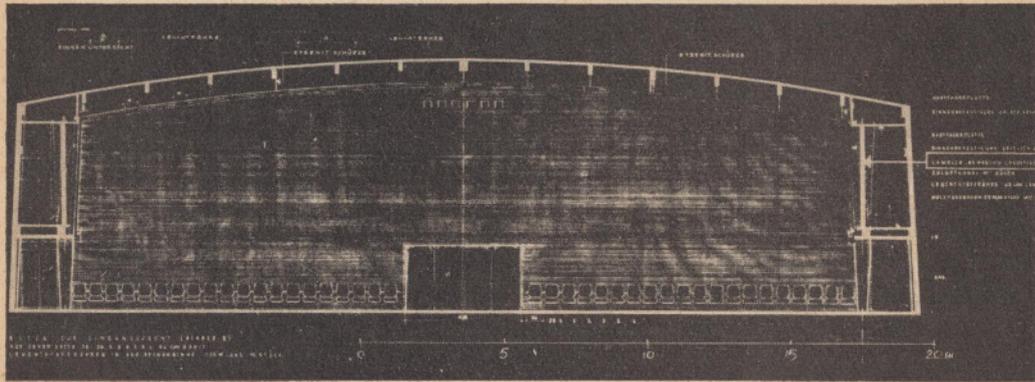


Abb. 9 Saalquerschnitt mit Schnitt durch Schallschluck-Körper

rund 900 AE (Absorptions-Einheiten = Quadratmeter-Flächen \times Schluckgrad) konnte der durch die Schallschluckkörper im Saal bewirkte Nachhallzeit-Unterschied bei 100% Schluckgrad-Unterschieden zwischen Vorder- und Rückseite äußerstenfalls (rechnerisch) zwischen 0,3 und 0,4 s liegen. Dieses Ziel ist mit guter Näherung auch erreicht worden.

Die landläufige Vorstellung von Schallschluckern aus porösen Platten mit einseitig sehr glatter Oberfläche, deren eine Seite absorbierend, die andere reflektierend wirken sollen, hat schon oft zu herben Enttäuschungen geführt — und zwar weniger hinsichtlich ihrer Absorption als wegen der vergeblich erwarteten Reflexion. Nicht nur Sperrholz, sondern auch Eisen- und sogar Glasplatten wirken nämlich als mitschwingende Schallschlucker und keinesfalls „schalltechnisch neutral“! Um diese Absorption für den praktischen Bedarf der Raumakustik auszuschalten, besteht nur die Möglichkeit, sie entweder sehr schwer auszubilden oder mit ungewöhnlich großem Abstand vor der schallharten Wand anzubringen oder beides. Dann und nur dann fällt nämlich ihre Maximal-Absorption in einen so tiefen Frequenzbereich, daß ihre schallschluckende Wirkung für das menschliche Ohr kaum mehr wahrnehmbar ist.

Als Schallschluck-Elemente mit ausreichend gleichmäßig starker Absorption in einem breiten Frequenzbereich kamen für den Rundfunksaal nur gekoppelte (mehrlagige) mitschwingende Schallschlucker nach dem von Meyer entdeckten Prinzip⁴⁾ in Frage. Es wurden hier 5 mit porösen Stoffen als Zwischenlagen und Abstandshalter hintereinandergefügte Folien und Platten als Schwingungs-Systeme verwendet. Das höchstabgestimmte System, bestehend aus einer

4) E. Meyer. Über das Schallschluckvermögen schwingungsfähiger, nicht poröser Stoffe. E. N. T. 13 (1936)

sehr leichten Kunststoff-Folie vor einer 5 mm dicken Filzschicht, liefert eine Maximalabsorption bei etwa 4000 Hz, das tiefste, bestehend aus 12 mm Rigips mit 30 cm Wandabstand, reicht bis in den Bereich von etwa 60 Hz. Die drei übrigen Zwischenlagen bestehen aus Pappen und Weichfaserplatten mit entsprechend bemessenen Gewichten und Luftpolsterdicken. Zur Herstellung der kleinen Schluckgrade steht zwischen Schallschluck-Körper und massiver Wand fast die gesamte Balkonbreite mit einem Abstand von mehr als 1,20 m zur Verfügung, wodurch die Maximalabsorption der Körper mit der Rigips-Seite zum Saal hin bei $f_0 \approx 20$ Hz liegt und bereits unter $4f_0 \approx 80$ Hz vernachlässigbar klein wird.

Den relativ größten Verdruß hinsichtlich der Raumakustik haben die auf den ersten Blick einfachsten Schallschluck-Flächen, die unverputzte Betondecken-Unterseite, bereitet. Im Interesse ihrer Reflexion brauchten diese Flächen keineswegs glatt oder eben, sondern nur porenfrei zu sein. Der erste Anstrich während der Bauzeit hat diese Aufgabe zweifellos nur mangelhaft erfüllt: Die Summe der offen gebliebenen oder nach Trocknen der Farbe neu aufgebrochenen Porenöffnungen wirkte in ihrer Vielzahl als hochabgestimmte Resonatoren, wodurch besonders die ober-tonreichen Streichinstrumente nicht frisch und lebendig genug klangen. Aus diesem Grunde mußte während des Betriebes ein zweiter alle Poren schließender Lackfarbenanstrich vorgenommen werden.

Die bei Fertigstellung jeweils eines Binderfeldes vorgenommenen Abhörproben und Nachhallmessungen ergaben schließlich nach Anstrich von 6 der insgesamt 11 Binderfelder allgemein zufriedenstellende Ergebnisse. Des ungeachtet befürwortete ich nach wie vor die Fortsetzung dieses Anstriches für die gesamte Deckenunterseite, weil hierdurch eine gewisse silberne Schärfe der Primärreflexionen noch weiter hervorgehoben werden würde, während etwa störende Nachhallverlängerungen durch Drehen einiger Schallkörper leicht auszugleichen wären.

Wände und Decken des Saales sind zweischalig als voneinander unabhängige Stahlbeton-Rahmen mit getrennten Fundamenten ausgeführt worden. Die Ausmauerung der Wandfelder erfolgte mit Bims- und Ytong-Steinen, die innere Decken- und die äußere Dachschale bestehen aus bewehrten Zementdielen. Die äußere Dachschale hat zusätzlich einen schwimmenden Beton-Estrich erhalten, der die eigentliche Dachhaut trägt und auf 4 cm dicken Sillanplatten aufliegt. Die Saaldecke ist insofern mit ihren drei dünneren Schalen hinsichtlich der Luftschalldämmung den beiden dickeren Wandschalen gleichwertig. Beider mittlere Dämmwerte liegen um etwa 80 dB.

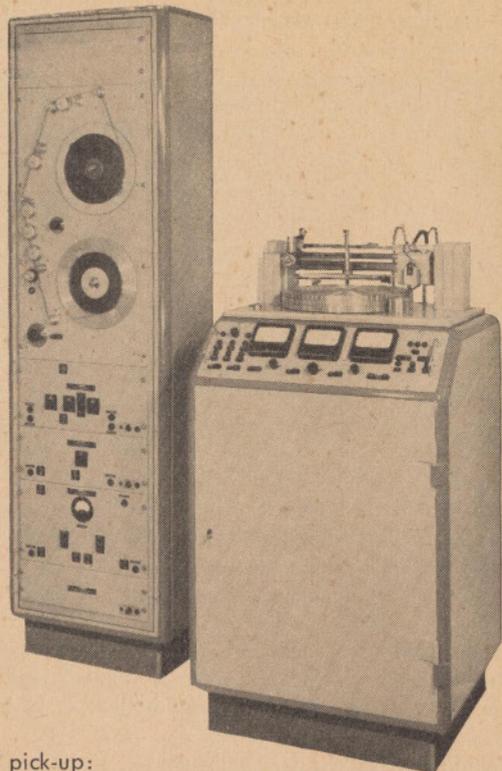
Der Raum zwischen den Wand- und Deckenschalen dient zur Aufnahme der Klimakanäle und der umfangreichen elektrischen Installation. Die Zuluftkanäle sind mit Luftschalldämmstrecken versehen; zwischen Klimazentrale und Saal mußten in die Abluftwege besondere Spezial-Schalldämpfer eingebaut werden, weil die verfügbaren Wege sehr kurz sind. Durch diese Maßnahmen erreichen die Lüftergeräusche den Saal mit Lautstärken unter 20 phon, sind also praktisch unhörbar.

ORTOFON

Disk recording equipment SV 8

33 1/3 - 45 - 78 r. p. m.

uniformity of speed for recording and reproducing together appr. $\pm 0,05\%$



ORTOFON moving coil pick-up:
no linear distortion
frequency range: 30 to 20.000 c/s; weight: 28 grams; inertia: 1 milli-grams; needle pressure: 3-10 grams; output: 50 m Volts (over 200.000 ohm) pr. m/m light band width.

ORTOFON moving coil cutting head with negative feed-back:
no linear distortion
frequency range: 30 to 18.000 c/s; amplitude range: 100 m/m light band width; weight 300 grams.

FONOFILM INDUSTRI A/S

5 Trommesalen
COPENHAGEN
Denmark

Klangumwandlungen durch Frequenzumsetzung

VON L. HECK UND F. BÜRCK

In der vorliegenden Arbeit wird nach einem Vorschlag von Professor H. Scherchen versucht, die beschriebenen Klangumwandlungen durch Beispiele auf einer beigefügten Schallplatte zu erläutern. Die Reihenfolge dieser Beispiele ist im Anhang angeführt. Zur Klarlegung der Begriffe sind die Bezeichnungen der physikalischen Größen besonders zusammengestellt und an den Beginn der Abhandlung gesetzt. Das Schrifttum ist nach Sachgebieten geordnet und befindet sich am Schluß des Artikels.

ZUSAMMENSTELLUNG DER VERWENDETEN BEZEICHNUNGEN

$\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$ [Hz]	Einzelne diskrete Frequenzen eines Originalspektrums
ν_i [Hz]	Eine beliebige Frequenz des Originalspektrums
$\sum \nu_i = \check{u}_0$ [Hz]	Gesamtes Spektrum eines Originalklanges
f_1, f_2, \dots, f_n [Hz]	Umgesetzte Frequenzen (entstanden durch einmalige Umsetzung von $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots, \nu_n$)
f_i [Hz]	Eine beliebige umgesetzte Frequenz
$\sum f_i = \check{u}_1$ [Hz]	Gesamtes umgesetztes Spektrum (entstanden durch einmalige Umsetzung von \check{u}_0)
$f_i^{(2)}, f_i^{(3)}, \dots, f_i^{(m)}$ [Hz]	Zwei-, drei- bzw. m-mal umgesetzte Frequenz (entstanden aus ν_i)
$\sum f_i^m = \check{u}_m$ [Hz]	Gesamtes Spektrum, m-mal umgesetzt (entstanden aus \check{u}_0)
$f_i^n; f_i^{n+1}$ [Hz]	Endprodukte einer mehrfach umgesetzten Frequenz
$\sum f_i^n = \check{u}_n; \sum f_i^{n+1} = \check{u}_{n+1}$ [Hz]	Endprodukte des Gesamtspektrums bei mehrfacher Umsetzung
f_v [Hz]	Virtuelle Grundfrequenz
Ω_1 [Hz]	Trägerfrequenz des Modulators
Ω_2 [Hz]	Trägerfrequenz des Demodulators
$\Omega_1 - \Omega_2 = \Delta \Omega$ [Hz]	Verstimmung

$\Omega_1 > \Omega_2$ [Hz]	Positive Verstimmung
$\Omega_1 < \Omega_2$ [Hz]	Negative Verstimmung
Z [sec]	Zeitlicher Abstand zwischen 2 Originaltönen
$1/Z$ [$1/\text{sec}$]	Impulsfolgefrequenz der Originaltöne, d. h., Zahl der Originaltöne pro Zeiteinheit
v_A [cm/sec]	Bandgeschwindigkeit bei der Aufnahme der Originalimpulse auf Magnetophon 1
v_W [cm/sec]	Bandgeschwindigkeit bei der Wiedergabe der Originalimpulse von Magnetophon 1
v_A/v_W	Transponierungsverhältnis ($v_A/v_W = 2$ bedeutet, daß die Wiedergabe um eine Oktave tiefer ist als das Original)
s [cm]	Abstand zwischen Aufnahme- und Wiedergabekopf bei Magnetophon 2
v [cm/sec]	Bandgeschwindigkeit auf Magnetophon 2
$T_s = \frac{s}{v}$ [sec]	Speicherzeit
$1/T_s = M$ [$1/\text{sec}$]	Metrum, d. h. die Zahl der Impulse pro Zeiteinheit, die durch Iteration über das Magnetophon 2 mit der Speicherzeit T_s erzeugt werden.

Die Entdeckung und Herstellung neuer Klänge kann vom physikalisch-technischen Standpunkt aus durch zwei Methoden geschehen:

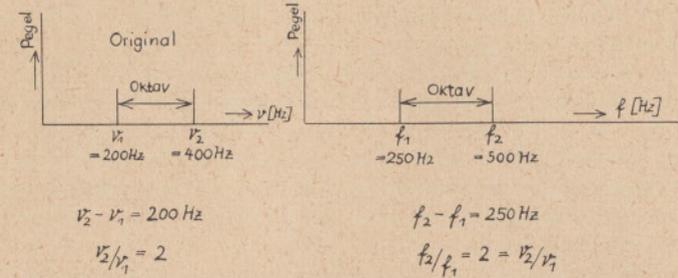
1. Durch synthetischen Aufbau eines Klangspektrums aus seinen Urelementen, den Sinustönen und Rauschspektren, unter Berücksichtigung der Ein- und Ausschwingvorgänge. Die Komposition solcher Klänge nach bestimmten, vom Komponisten aufgestellten Vorschriften bildet die Grundlage der elektronischen Musik.
2. Durch Umformung der in der Natur — speziell in der Musik — vorkommenden Klänge und Geräusche mit elektrischen Mitteln. Diese Abwandlung der Originalstruktur eines vorgegebenen Klanges gehört in das Gebiet der musique concrète.

Die folgende Abhandlung soll eine weitere Möglichkeit zur Klangumformung nach der letztgenannten Methode aufzeigen. Als Ausgangsmaterial dienen vorgegebene Klänge bzw. Geräusche, die nach dem Prinzip der „Frequenzumsetzung“ in ihrer Struktur vollkommen geändert werden. Dabei steht der Begriff der Fre-

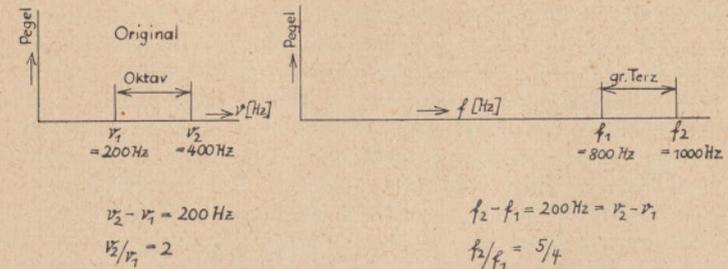
quenzumsetzung dem Begriff der „Transponierung im musikalischen Sinne“ gegenüber. Abb. 1 zeigt schematisch die beiden Unterschiede. Bei der musikalischen

Abb. 1

Transponierung im musikalischen Sinne



Frequenzumsetzung



Transponierung werden 2 Frequenzen v_1 und v_2 nach oben oder unten verschoben, jedoch so, daß das Intervallverhältnis v_2/v_1 konstant bleibt. Es ändert sich aber die Differenz $v_2 - v_1$. Es tritt eine Frequenzbandspreizung bzw. -schrumpfung ein. Für die musikalischen Intervalle sind allein die Frequenzverhältnisse bestimmend. Es bleibt daher in dem vorliegenden Beispiel das Oktavverhältnis der beiden Frequenzen erhalten.

Ganz anders liegen die Verhältnisse bei der Frequenzumsetzung. Hier werden die beiden Frequenzen v_1 und v_2 (s. Abb. 1, untere Hälfte) nach oben oder unten so verschoben, daß ihre Differenz konstant bleibt, $v_2 - v_1 = f_2 - f_1$. Es ist verständlich, daß sich bei der Frequenzumsetzung das ursprüngliche musikalische Intervall v_2/v_1 ändert. Im vorliegenden Beispiel wird aus dem Intervall der Oktav $v_2/v_1 = 2$ eine große Terz $f_2/f_1 = 5/4$. Der gezeichnete Fall stellt aber nur eine der vielen Möglichkeiten dar. Durch langsame Verschiebung der beiden Frequenzen z. B. nach oben schrumpft das ursprüngliche Intervallverhältnis kontinuierlich immer mehr

zusammen, wobei unendlich viele Zwischenwerte gebildet werden. Durch diese Frequenzumsetzung wird daher die musikalische Beziehung der beiden Frequenzen ν_1 und ν_2 vollkommen geändert. Die Frequenzumsetzung stellt einen schwerwiegenden Eingriff in die Klangstruktur dar. Während bei der musikalischen Transponierung wohl die Tonhöhe aber nicht das Intervall geändert wird, verändern sich bei der Frequenzumsetzung sowohl die Tonhöhe als auch das Intervall, es tritt eine Intervallspreizung bzw. -schrumpfung ein.

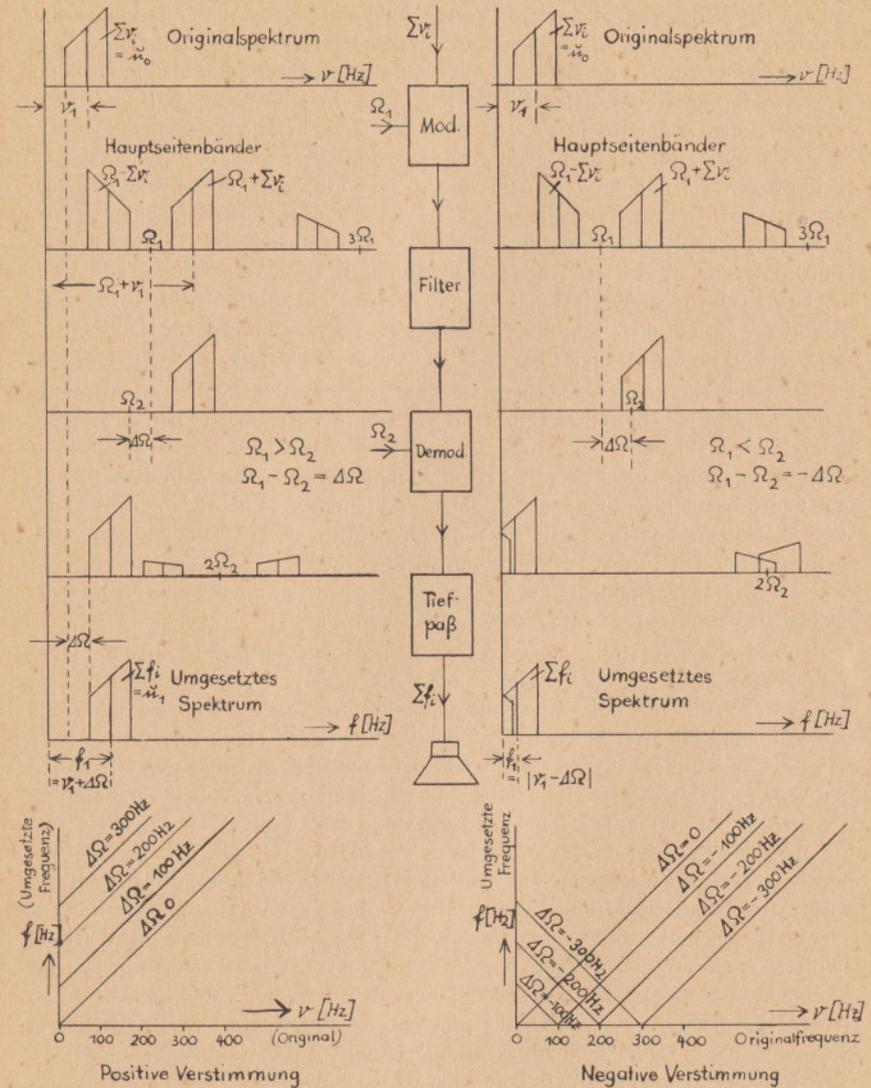
Für die praktische Durchführung der Frequenzumsetzung eignen sich die bekannten Schaltungen der elektrischen Nachrichtentechnik. In der Nachrichtentechnik besteht das Endziel aber darin, die Originalmodulation naturgetreu am Empfangsort zu reproduzieren. Im Gegensatz hierzu werden für die Erzeugung neuer Klänge absichtlich Verstimmungen vorgenommen, die es erlauben, einen Klang nach oben oder unten so zu verschieben, daß die oben erläuterten Kennzeichen der Frequenzumsetzung erfüllt sind.

Abb. 2 zeigt schematisch das Prinzip einer solchen Schaltung. In der Mitte des Bildes sind die elektrischen Blockschaltbilder, links und rechts die zugehörigen klanglichen Umwandlungsprodukte aufgezeichnet. Dabei beziehen sich die linke und rechte Seite des Bildes auf die beiden möglichen Fälle einer positiven bzw. negativen Verstimmung. Das Bild ist von oben nach unten zu lesen.

Die Modulationsstufe besteht gewöhnlich aus einem Ringmodulator. Ihm werden ein Originalspektrum $\Sigma \nu_i$ und eine Trägerfrequenz Ω_1 zugeführt. Das Originalspektrum kann aus einem Linienspektrum (z. B. Tongemische oder Klänge), aus einem kontinuierlichen Spektrum (z. B. farbiges Rauschen) oder einem gemischten Spektrum (z. B. Geräusche mit ausgeprägter Tonhöhe) bestehen. ν_i sei eine diskrete Frequenz des Gesamtspektrums $\Sigma \nu_i$. Infolge der Wirkungsweise des Ringmodulators entstehen hinter dem Modulator 2 Hauptseitenbänder $\Omega_1 + \Sigma \nu_i$ und $\Omega_1 - \Sigma \nu_i$, ferner Seitenbänder höherer Ordnung. Am Ausgang der Modulationsstufe liegt ein Kanalfilter, welches das obere Hauptseitenband $\Omega_1 + \Sigma \nu_i$ passieren läßt, die übrigen Seitenbänder aber unterdrückt. Das obere Seitenband und ein zweiter Träger Ω_2 werden einem Demodulator zugeführt. Auch hier wird mit Vorteil eine Ringmodulatorschaltung verwendet. In Abb. 2 wurden die Verhältnisse so gewählt, daß in dem Beispiel auf der linken Bildseite Ω_1 größer als Ω_2 und in dem Beispiel auf der rechten Bildseite Ω_1 kleiner als Ω_2 ist. Die Differenz $\Omega_1 - \Omega_2 = \Delta \Omega$ wird als Verstimmung bezeichnet. Im Fall $\Omega_1 > \Omega_2$ spricht man von einer positiven, im Fall $\Omega_1 < \Omega_2$ von einer negativen Verstimmung. Wenn $\Omega_1 - \Omega_2 = 0$ ist, wird durch den Demodulator das obere Frequenzband genau in die Ausgangsstellung des Originalspektrums zurückgeschoben, d. h. zwischen Originalspektrum und umgesetztem Spektrum besteht kein physikalischer und klanglicher Unterschied. Der in dem Schaltschema eingezeichnete Tiefpaß sorgt für die Ausfilterung der bei der Demodulation entstehenden Seitenbänder.

Tritt eine Verstimmung $\Delta \Omega$ auf, so wird jede Frequenz ν_i um denselben Betrag $\Delta \Omega$ nach oben oder unten verschoben. Die zugehörige Frequenz f_i im umgesetzten

Abb. 2 Schematische Darstellung der physikalischen Vorgänge bei der Frequenzumsetzung.



Spektrum ist $f_i = v_i \pm |\Delta\Omega|$. Das obere Vorzeichen gilt für positive, das untere Vorzeichen für negative Verstimmung. Die graphischen Darstellungen in Abb. 2 geben den Zusammenhang zwischen der umgesetzten Frequenz f_i und der Originalfrequenz v_i für verschiedene positive bzw. negative Verstimmungen. Bei positiver Verstimmung ist die umgesetzte Frequenz f_i immer größer als die Originalfrequenz v_i . Bemerkenswerte Klangergebnisse entstehen bei negativer Verstimmung. Ist die Originalfrequenz v_i größer als $|\Delta\Omega|$, so ist die umgesetzte Frequenz f_i stets um den Betrag $|\Delta\Omega|$ kleiner als die Originalfrequenz v_i . Es gilt in diesem Falle: $f_i = v_i - |\Delta\Omega|$. Für $v_i = |\Delta\Omega|$ wird $f_i = 0$. Ist die Originalfrequenz v_i kleiner als $|\Delta\Omega|$, so berechnet sich die umgesetzte Frequenz f_i aus $f_i = |\Delta\Omega| - v_i$. Wird z. B. der Schaltanordnung ein in seiner Höhe stetig ansteigender Sinuston zugeführt, so ergibt sich bei der Frequenzumsetzung mit einer Verstimmung von $\Delta\Omega = -300$ Hz folgender Effekt: Steigt v_i von 0 bis 300 Hz kontinuierlich an, so sinkt f_i von 300 Hz auf 0 Hz kontinuierlich. Erst bei Frequenzen $v_i \geq 300$ Hz steigt die umgesetzte Frequenz f_i im selben Sinne wie v_i , jedoch ist f_i um 300 Hz tiefer als v_i .

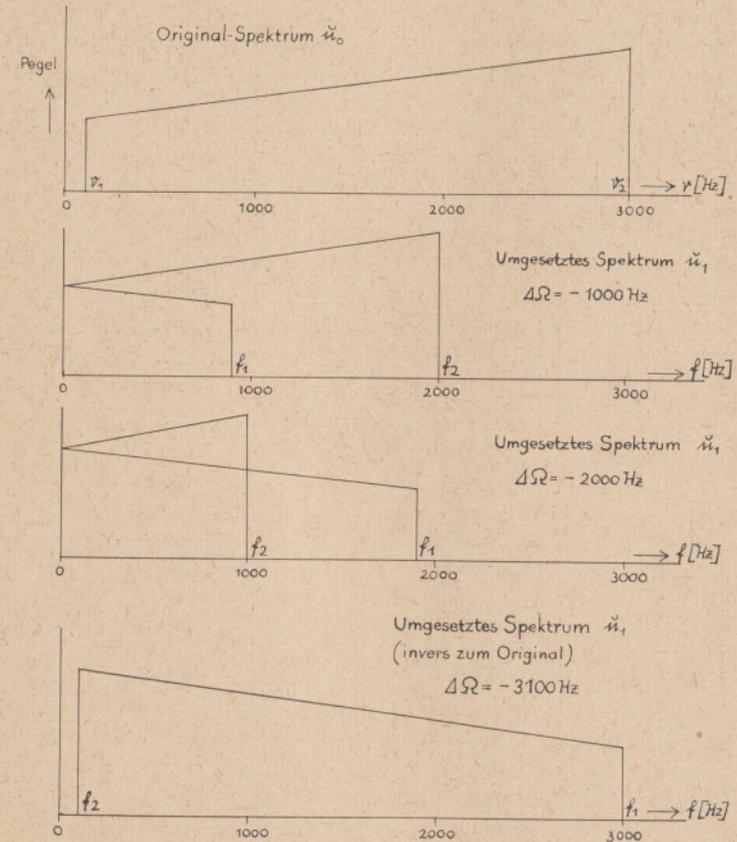
Besteht die Modulation aus einem Grundton mit harmonischen Oberschwingungen, so ergibt sich bei einer Umsetzung in eine höhere Lage (positive Verstimmung) ein Spektrum, bei dem die Reihenfolge der Harmonischen zwar gewahrt bleibt (Regelfolge), der Intervallabstand, d. h. das Frequenzverhältnis zweier aufeinanderfolgender Komponenten sich aber verkleinert. Aus dem Klang mit Grund- und Obertönen entsteht somit ein Sinustongemisch, dessen Komponenten nicht mehr harmonisch zu den tiefsten Komponenten liegen. Es läßt sich jedoch nachweisen, daß die Komponenten des umgesetzten Spektrums als Harmonische einer virtuellen Grundfrequenz aufgefaßt werden können.

Bei negativer Verstimmung wird das vorgegebene Originalspektrum in tiefere Frequenzlagen umgesetzt. Läßt man die negative Verstimmung langsam wachsen, so rückt das umgesetzte Spektrum der Ordinate $f = 0$ immer näher und wird schließlich in zwei Teile getrennt, die übereinander zu liegen kommen. Abb. 3 zeigt die Verhältnisse für ein Originalspektrum, welches zwischen den Grenzwerten $v_1 = 100$ Hz und $v_2 = 3000$ Hz liegen möge. Mit zunehmender Verstimmung werden die umgeklappten Teile immer größer. Beim Wert $\Delta\Omega = -3100$ Hz erscheint das Originalspektrum vollkommen umgeklappt. Hier liegen alle Frequenzen f_i in Kehrfolge gegenüber dem Originalklang. Die ursprünglich tiefste Frequenz des Originalspektrums v_1 entspricht z. B. bei einer Verstimmung von $\Delta\Omega = -3100$ Hz der höchsten Frequenz im umgesetzten Spektrum f_1 . Umgekehrt ist die höchste Originalfrequenz v_2 zur tiefsten Frequenz f_2 geworden. Durch diese Umklappung entstehen somit „inverse“ Klänge. Aus der Abb. 3 und der Gleichung $f_i = |\Delta\Omega| - v_i$ ergibt sich weiter, daß im umgesetzten Spektrum alle diejenigen Komponenten in Kehrfolge liegen, deren Originalfrequenz v_i kleiner als $|\Delta\Omega|$ ist.

Teil 1 der beigefügten Schallplatte zeigt die Klangwirkungen solcher Frequenzumsetzungen bei verhältnismäßig geringen Verstimmungen. Es sind 3 Beispiele aufgezeichnet und zwar die Umsetzung einer einfachen Klavier-, einer Cembalo- und einer Harfenstimme. Im letztgenannten Beispiel wurde der Träger Ω_2 zusätz-

lich gewobelt, er wurde periodisch 32 mal pro sec um einen Betrag $\delta\Omega = 200$ Hz geändert. Es ist klar, daß durch die Frequenzumsetzung die einzelnen Töne aus ihrem bisherigen tonalen Gefüge herausgenommen werden. Die Begriffe einer reinen oder temperierten Stimmung verlieren bei diesen Umsetzungen jeden Sinn, da die umgesetzte Frequenz f_i zwar in mathematischen Beziehungen zur Originalfrequenz v_i steht, sich aber an keine musikalisch-tonalen Bindungen hält. Infolge der Intervallschrumpfung bzw. -spreizung treten gegenüber dem Original starke

Abb. 3 Beispiel für die Verschiebung des Frequenzspektrums bei negativer Verstimmung.



Klangfärbungen auf, die zum Teil kaum noch einen Rückschluß auf den Originalklang erlauben. Die Klangverfärbungen sind bei diesen Beispielen am stärksten bei den tiefen Tönen, die höheren Lagen werden weniger stark geändert. Für die

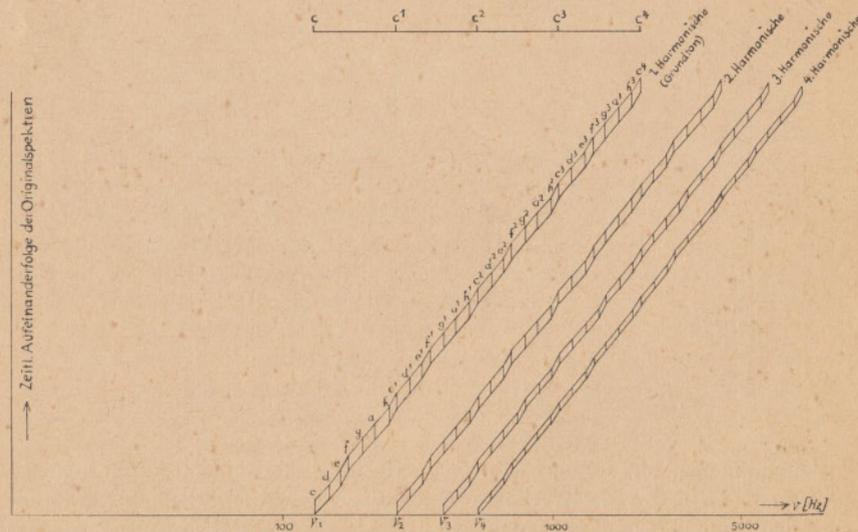
Intervalle im umgesetzten Spektrum gilt die Beziehung $f_2/f_1 = \frac{v_2 \pm \Delta\Omega}{v_1 \pm \Delta\Omega}$, d.h. je größer v_1 und v_2 sind — gegenüber $\Delta\Omega$ — desto weniger ändert sich der Wert des obigen Bruches.

Im Teil 2 der Schallplatte wurden 2 umgesetzte Einzelstimmen übereinander kopiert. Die Oberstimme entstand durch Klangumformung von Cembafonklängen, die Unterstimme durch Klangumformung einer zugehörigen Klavierpassage. Mit diesem Beispiel soll gezeigt werden, daß eine polyphone Führung solcher umgesetzten Stimmen möglich ist. Der Zusammenhang in horizontaler Richtung bleibt für die subjektive Hörempfindung gewahrt, so daß trotz der veränderten Klangwirkung die Stimmführung erkennbar bleibt.

Die bisherigen Ausführungen zeigten, daß die Frequenzwerte des umgesetzten Spektrums ohne weiteres aus dem Originalspektrum abzuleiten sind. Diese mathematisch abgeleiteten Beziehungen sagen aber nichts über den subjektiven Höreindruck, insbesondere bei inversen Klangspektren aus. Es zeigt sich beim Abhören solcher inverser Klangbilder, daß diese Klänge auf einem Grundton basieren, dessen Höhe aber nicht rechnerisch voraus bestimmt werden kann.

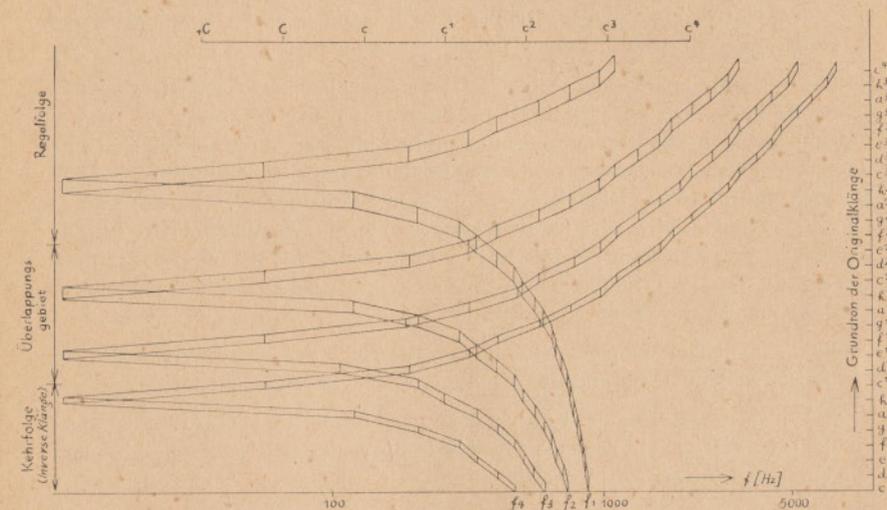
Teil 3 der Schallplatte bringt die Klangwirkungen solcher inverser Klänge zum Ausdruck. Es wird zunächst eine chromatische Klaviertonleiter im Original gespielt. Sofort anschließend ist die umgesetzte Tonleiter zu hören, sie gilt für eine Verstimmung von $\Delta\Omega = -1000$ Hz. Der Charakter der aufsteigenden Tonfolge ist nur in den tiefen und in den hohen Frequenzbereichen gewahrt. Im Zwischenbereich entstehen durch die Umsetzung Klänge, die sich nicht mehr in die stetige

Abb. 4 Frequenzspektrum einer aufsteigenden Tonleiter mit 4 Harmonischen.



Aufwärtsbewegung einfügen, sondern nach oben und unten scheinbar regellos springen. Zur Erklärung dieses Phänomens sind in Abb. 4 die Linienspektren einer Dur-Tonleiter von c bis c⁴ übereinander aufgezeichnet, allerdings unter der vereinfachten Annahme, daß der Klang sich in jeder Tonlage nur aus dem Grundton (1. Harmonische) und 3 Obertönen (2. bis 4. Harmonische) zusammensetzt. Das Amplitudenverhältnis der Obertöne wurde ebenfalls willkürlich mit 5 : 4 : 3 : 2 festgesetzt. Das Schema zeigt z. B. die zum Grundton c (v₁) gehörenden Harmonischen c¹ (v₂), g¹ (v₃) und c² (v₄). In Abb. 5 sind die zugehörigen Linienspektren übereinander aufgezeichnet, die sich bei einer Frequenzumsetzung mit einer negativen Verstimmung von $\Delta\Omega = -1000$ Hz ergeben. Es zeigt sich, daß die Ori-

Abb. 5 1. Frequenzumsetzung der in Abbildung 4 gezeichneten Originalspektren.



nalklänge, die auf den Grundtönen c bis c¹ basieren, im umgesetzten Spektrum als inverse Klänge erscheinen. In diesem Bereich wird der ursprüngliche Grundton zur höchsten Komponente im umgesetzten Spektrum, die 4. Harmonische wird zur tiefsten Komponente. Die Originalklänge, die auf den Grundtönen d¹ bis e² basieren, werden so umgesetzt, daß zunächst die 3. Harmonische zur tiefsten Komponente wird und dann die 2. Harmonische. Wir befinden uns hier in einem Überlappungsgebiet. Es entstehen Linienspektren, bei denen die Komponenten zum Teil in Kehrfolge liegen und zum Teil in Regelfolge. Erst ab dem Originalton f² erscheinen die Komponenten im umgesetzten Spektrum wieder in Regelfolge, d. h. der ursprüngliche Grundton wird im umgesetzten Spektrum zur tiefsten Komponente und die 4. Harmonische wird zur höchsten Komponente. Von f² bis h¹ führt im umgesetzten Spektrum die tiefste Komponente allerdings noch eine

Abwärtsbewegung durch im Gegensatz zum Grundton des Originalklanges. Erst ab h^2 befinden sich alle Komponenten in einer Aufwärtsbewegung, analog zu den Harmonischen des Originalklanges, jedoch mit ganz anderen Intervallschritten.

Der Höreindruck der umgesetzten chromatischen Tonleiter kann folgendermaßen beschrieben werden:

1. Die inversen Klänge in der tiefen Lage zeigen eine Aufwärtsbewegung. Versucht man die Tonhöhen dieser Klänge zu definieren, so stellt man fest, daß sich um einen scheinbar tonalen Schwerpunkt verschiedene Klangkomponenten anhäufen. Es kann von einer streng definierten Tonhöhe im musikalischen Sinn kaum gesprochen werden.
2. Im mittleren Überlappungsgebiet folgen die Töne keineswegs einer stetigen Aufwärtsbewegung, im Gegenteil, es entstehen tonale Sprünge nach oben und unten, unter Umständen sogar Abwärtsbewegungen.
3. Über diesem Überlappungsgebiet setzt eine regelmäßige Aufwärtsbewegung ein. Es liegen hier wieder alle Klangkomponenten in Regelfolge.

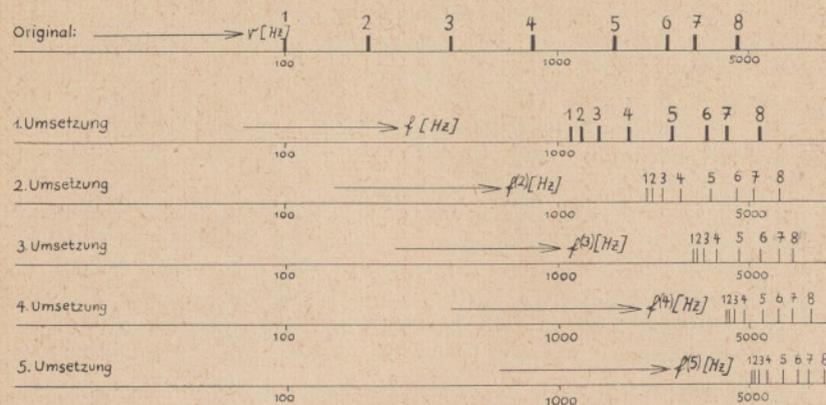
Vergleicht man den Höreindruck mit dem in Abb. 5 gezeichneten Klangschemata der umgesetzten Frequenzen, so besteht bezüglich ihrer subjektiven Tonhöhe — bezogen auf die tiefste Klangkomponente — nur in dem oberen Bereich genaue Übereinstimmung, also dort wo die Komponenten in Regelfolge auftreten. Die Tonhöhe des umgesetzten Klanges liegt um den Betrag $\Delta\Omega$ tiefer als der Grundton des zugehörigen Originalklanges. Im Überlappungsgebiet können die tonalen Sprünge nur dadurch erklärt werden, daß

1. die tiefsten Klangkomponenten zum Teil unterhalb der Hörschwelle liegen, so daß der subjektiv empfundene Grundton auf eine andere Komponente springt;
2. das Frequenzspektrum des Klaviertones sowohl in Bezug auf Anzahl der Harmonischen als auch in Bezug auf Amplitudenverteilung viel umfangreicher und komplizierter liegt als in dem gezeichneten Beispiel;
3. die Verdeckungseffekte besonders bei nahe liegenden Komponenten eine wesentliche Rolle spielen.

Unter Berücksichtigung dieser Umstände lassen sich für das Überlappungsgebiet und für die inversen Klänge selbst aus einer erweiterten graphischen Darstellung kaum Rückschlüsse auf die zu erwartende subjektive Tonhöhe des umgesetzten Klanges ziehen. Diese Tonhöhe steht im allgemeinen in keinem rationalen Verhältnis zur Tonhöhe des Originalklanges, d. h. die Begriffe der Intervalle (Oktave, Quinte, Quarte usw.) sind Ausnahmefälle und Zufallsprodukte.

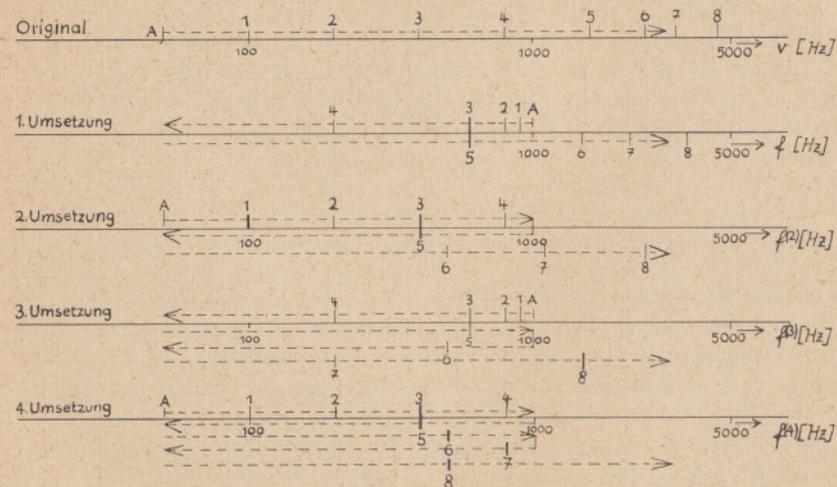
Die bisherigen Untersuchungen bezogen sich auf eine einmalige Umsetzung eines Originalklanges. Es soll nun in dem folgenden Abschnitt untersucht werden, wie sich mehrfache Frequenzumsetzungen klanglich auswirken. Abb. 6 zeigt die Bewegung eines Tongemisches bei mehrfacher Frequenzumsetzung, unter Zugrundelegung einer jeweils konstanten Verstimmung von $\Delta\Omega = +1000$ Hz. Im

Abb. 6 Bewegung eines Tongemisches bei mehrfacher Frequenzumsetzung. Verstimmung jeweils = + 1000 Hz.



Originalklang sind 8 beliebige Klangkomponenten aufgezeichnet, bei der ersten Frequenzumsetzung wandern diese Komponenten um jeweils 1000 Hz nach oben, gemäß der graphischen Darstellung in Abb. 2, linke Bildseite. Wird das Produkt dieser ersten Frequenzumsetzung nochmals bei derselben Verstimmung umgesetzt, so wandern die Komponenten um weitere 1000 Hz nach oben. Für jede wei-

Abb. 7 Bewegung eines Tongemisches bei mehrfacher Frequenzumsetzung. Verstimmung jeweils = - 1000 Hz.



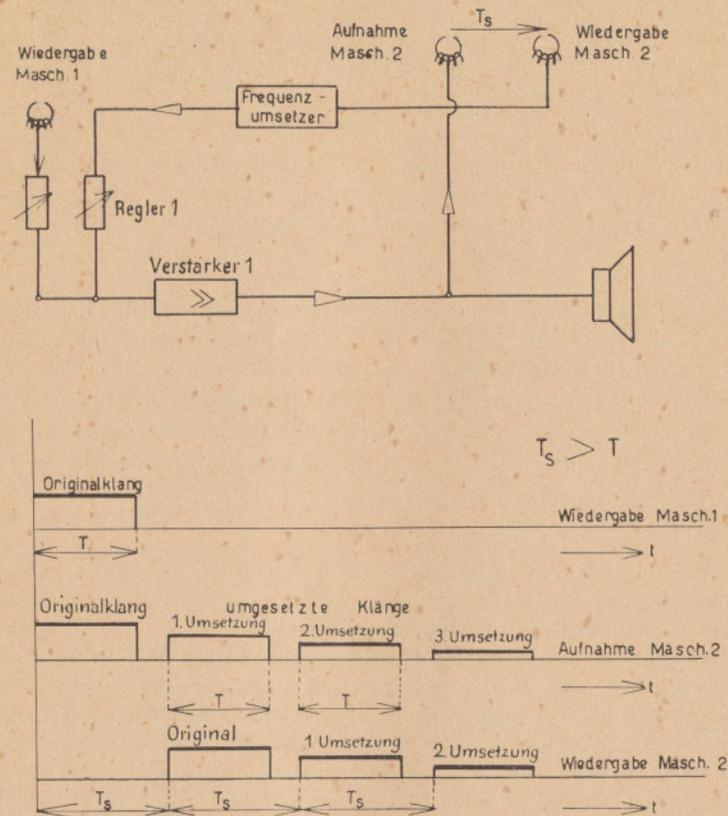
tere Frequenzumsetzung gilt dasselbe Prinzip. Man erkennt aus der Darstellung, daß der umgesetzte Klang in seiner Tonhöhe immer stärker in die oberen Frequenzbereiche hineinrückt und schließlich über die Hörschwelle hinausgleitet. Wird dasselbe Verfahren mit einer konstanten negativen Verstimmung durchgeführt, so gibt über das Ergebnis Abb. 7 Aufschluß. Es sind zwei Bereiche zu unterscheiden:

1. Durch fortgesetzte Frequenzumsetzung werden bei negativer Verstimmung alle Klangkomponenten, die größer als $|\Delta\Omega|$ sind, von oben nach unten abgebaut und in den Bereich von 0 bis $|\Delta\Omega|$ hineingeschoben.
2. Jede im Bereich von 0 bis $|\Delta\Omega|$ liegende Klangkomponente wird (s. graphische Darstellung Abb. 2) durch fortgesetzte Frequenzumsetzung abwechselnd in zwei feste Frequenzen umgesetzt. Man betrachte in Abb. 7, erste Zeile, z. B. die Originalkomponente $\nu_1 = 100$ Hz: Bei der ersten Frequenzumsetzung entsteht eine Frequenz von $f_1 = 900$ Hz, bei der zweiten Frequenzumsetzung wird diese erste Komponente von 900 Hz wieder auf ihren alten Wert zurückgesetzt, d. h. die erste Komponente hat wieder den Wert von $f_1^{(2)} = \nu_1 = 100$ Hz. Die dritte Frequenzumsetzung gibt dasselbe Ergebnis wie die erste Frequenzumsetzung usw. Die dauernde Frequenzumsetzung liefert also für Komponenten, die zwischen 0 und $|\Delta\Omega|$ liegen zwei periodisch wechselnde Umsetzungsprodukte. Da nach einer größeren Anzahl von Umsetzungen alle Klangkomponenten in diesem erwähnten Bereich zusammentreffen, entstehen zwei Endprodukte, und zwar ein Endprodukt für geradzahlige Frequenzumsetzungen (\bar{u}_n) und ein Endprodukt für ungeradzahlige Frequenzumsetzungen (\bar{u}_{n+1}), in denen die Klangkomponenten in Bezug auf die Endfrequenz 0 und $|\Delta\Omega|$ spiegelbildlich liegen.

An Hand der Abb. 7 kann noch auf eine weitere interessante Erscheinung hingewiesen werden, die bei mehrfacher Frequenzumsetzung auftritt. Es sei angenommen, daß die im Originalspektrum angegebenen Komponenten ν_1 bis ν_n nicht gleichzeitig sondern nacheinander erklingen, und zwar seien die angegebenen Komponenten nur ein paar diskrete Frequenzen aus einem von unten nach oben gleitenden Sinuston. Nach der vierten Umsetzung erhält man dann z. B. folgendes Ergebnis: Der mehrfach umgesetzte gleitende Sinuston beginnt in tiefer Lage wie im Original (bei Punkt A = Anfang) und gleitet nach oben in eine Tonhöhe bis zu 1000 Hz. Hier wird der erste Umkehrpunkt erreicht, der Ton gleitet wieder abwärts bis zur Frequenz 0 Hz, d. h. in der ganz tiefen Lage verschwindet er für einen Augenblick aus dem Hörbereich, dann führt der Ton nochmals die gleiche Auf- und Abwärtsbewegung durch und erst bei der dritten Aufwärtsbewegung gleitet der Ton weiter stetig nach oben. Die viermalige Frequenzumsetzung mit der Verstimmung $\Delta\Omega = -1000$ Hz wirkt auf den gleitenden Sinuston wie eine „Sperre“. Es gelingt, den Ton dauernd zwischen 0 und 1000 Hz hin und her pendeln zu lassen, wenn man nur genügend viele Frequenzumsetzungen durchführt.

Mehrfache Frequenzumsetzungen lassen sich nach dem Iterationsverfahren mit Hilfe eines Magnetofons gemäß Abb. 8 erzeugen. Ein Originalklang von der Zeitdauer T wird über einen Verstärker dem Aufnahmekopf des Magnetofons 2 zu-

Abb. 8 Schaltung für mehrfache Frequenzumsetzung und schematische Darstellung der Wirkungsweise $T_s > T$.



geführt. Nach einer bestimmten Speicherzeit T_s wird vom Wiedergabekopf des Magnetofons 2 das Original abgenommen und dem Frequenzumsetzer zugeführt. Das Produkt der ersten Frequenzumsetzung wird erneut dem Aufnahmekopf der Maschine 2 zugeführt, die nach der Speicherzeit T_s den Frequenzumsetzer mit dem ersten Umsetzprodukt speist. Die entstehende zweite Frequenzumsetzung wird erneut dem Magnetofon 2 zugeführt usw. Auf diese Weise können mehrfache Umsetzungen eines Klanges in einem einzigen Arbeitsgang durchgeführt werden.

Es müssen nun bei der mehrfachen Iteration über Magnetofon 2 und den Frequenzumsetzer zwei Fälle in Bezug auf die Speicherzeit T_s und die Dauer des Originalklangs T unterschieden werden:

Erster Fall: $T < T_s$

Die graphische Darstellung der Abb. 8 zeigt die Verhältnisse. Originalklang und umgesetzte Produkte reihen sich mit kurzen Pausen aneinander, wobei die jeweilige Pause durch die Zeitdifferenz $T_s - T$ gegeben ist. Im Teil 4 der beigefügten Schallplatte sind 3 Beispiele der Frequenzumsetzung eines einfachen Geigenpizzicatoklanges wiedergegeben.

Beispiel a

Es gelten folgende Einstellungswerte:

Transponierungsverhältnis	$V_A/V_W = 1$
Zeitlicher Abstand der Originalimpulse	$Z = 5 \text{ sec}$
Verstimmung	$\Delta\Omega = -50 \text{ Hz}$
Speicherzeit	$T_s \approx 0,2 \text{ sec}$

Es zeigt sich, daß durch die Frequenzumsetzung eine tonleiterähnliche Bewegung jedes Pizzicatoklanges entsteht, die tonal nach abwärts führt. Es wurde nur eine verhältnismäßig geringe Verstimmung angewendet, daher sind die Restprodukte nicht hörbar. Bei den gegebenen Verhältnissen beträgt der Abstand zweier Umsetzungsfrequenzen $f_i^{(m)} - f_i^{(m+1)}$ in aufeinanderfolgenden Frequenzumsetzungen jeweils 50 Hz. Der musikalische Intervallschritt $f_i^{(m)}/f_i^{(m+1)}$ verändert sich dementsprechend von Umsetzung zu Umsetzung.

Beispiel b

Es gelten folgende Einstellungswerte:

Transponierungsverhältnis	$V_A/V_W = 1$
Zeitlicher Abstand der Originalimpulse	$Z = 5 \text{ sec}$
Verstimmung	$\Delta\Omega = +50 \text{ Hz}$
Speicherzeit	$T_s \approx 0,2 \text{ sec}$

Es entsteht auch hier eine tonleiterähnliche Bewegung der umgesetzten Pizzicatoklänge, die aber nach aufwärts führt.

Es muß noch erwähnt werden, daß sich bei starker Rückkopplung, d. h. bei kleiner Dämpfung im Regler 1, die Umsetzungsprodukte der einzelnen Originalimpulse überlappen können. Es sind dann die Umsetzungsprodukte des ersten Impulses noch nicht abgeklungen, wenn der zweite Originalimpuls schon einsetzt usw. Es ist bekannt, daß durch solche Rückkopplungsschaltungen kanonartige Stimmführungen erzielt werden können. Ein solcher Fall wird in Beispiel 3 dargestellt und zwar wurde im Gegensatz zu den Beispielen 1 und 2 eine schnellere Impulsfolgefrequenz der Originaltöne angewendet.

Beispiel c

Es gelten folgende Einstellungswerte:

Transponierungsverhältnis	$V_A/V_W = 1$
Zeitlicher Abstand der Originalimpulse	$Z \approx 1 \text{ sec}$
Verstimmung	$\Delta\Omega = -50 \text{ Hz}$
Speicherzeit	$T_s \approx 0,2 \text{ sec}$

Durch starke Rückkopplungen wurde das kanonartige Zusammenklingen der Umsetzungsprodukte besonders hervorgehoben. Da die Originalimpulse Töne einer aufsteigenden Tonleiter, die Frequenzumsetzungsprodukte dagegen nach abwärts gerichtet sind, entsteht eine reizvolle Gegenbewegung von Originalimpulsen und Umsetzungsklangen. Nach Aufhören der Impulse gleitet der Klanghaufen von oben nach unten.

Im Beispiel d der Schallplatte sind die Umsetzungsprodukte kurzer Flötentöne aufgezeichnet.

Es gelten folgende Einstellungswerte:

Transponierungsverhältnis	$V_A/V_W = 1$
Zeitlicher Abstand der Originalimpulse	$Z \approx 1,5 \text{ sec}$
Verstimmung	$\Delta\Omega = -60 \text{ Hz}$
Speicherzeit	$T_s \approx 1,5 \text{ sec}$

Es entstehen, ähnlich wie bei dem Geigenpizzicato, tonleiterähnliche Klangfolgen nach abwärts. Da eine verhältnismäßig kleine Verstimmung angewendet wurde, werden die Endprodukte nicht erreicht.

Im Teil 5 der Schallplatte ist ein Beispiel für die Umsetzung von Klaviertönen bei einer großen negativen Verstimmung niedergelegt.

Es gelten folgende Einstellungswerte:

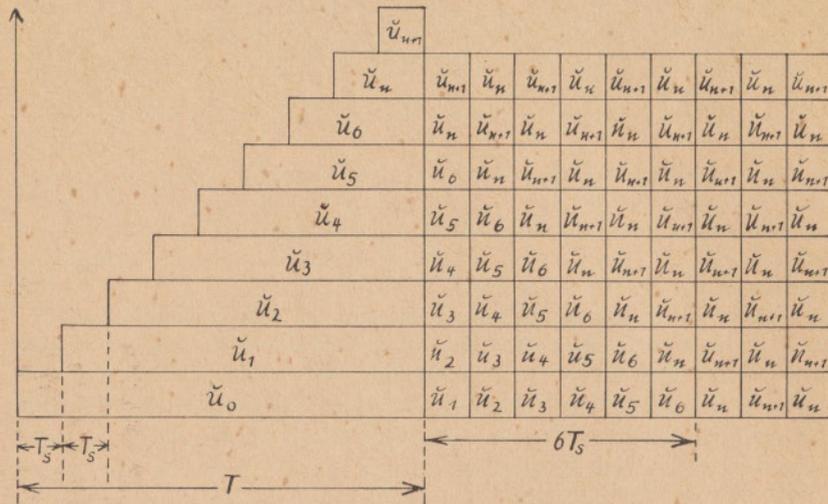
Transponierungsverhältnis	$V_A/V_W = 1$
Zeitlicher Abstand der Originalimpulse	$Z = 5 \text{ sec}$
Verstimmung	$\Delta\Omega \approx -400 \text{ Hz}$
Speicherzeit	$T_s \approx 0,2 \text{ sec}$

Es werden somit während der Zeit $Z = 5 \text{ sec}$ ca. 25 Frequenzumsetzungen durchgeführt. Für die Tonhöhe der einzelnen Umsetzungsprodukte gelten ähnliche Überlegungen, wie für die bereits besprochenen Verhältnisse bei der Umsetzung der chromatischen Klaviertonleiter. Deutlich ist hier der Wechsel der beiden Endprodukte \ddot{u}_n und \ddot{u}_{n+1} zu hören. Dieser rhythmische Wechsel, der sich durch die gesamte Aufnahme erstreckt, wirkt bei dieser großen Verstimmung als Ostinato.

Zweiter Fall: $T \gg T_s$

In diesem Fall bleibt der Originalimpuls über eine längere Zeit T bestehen, während infolge der kleinen Speicherzeit T_s gleichzeitig die Umsetzungsprodukte des Originalklanges gebildet werden. In Abb. 9 ist der Vorgang schematisch dargestellt, wobei angenommen wurde, daß keinerlei Dämpfung durch die Rückkopplung entsteht. Die während der Zeit T gebildeten Umwandlungsprodukte bleiben sämtlich während dieser Zeit bestehen. Es bilden sich \ddot{u}_1 nach der Speicherzeit T_s , \ddot{u}_2 nach der Zeit $2T_s$, \ddot{u}_3 nach der Zeit $3T_s$ usw. Es stocken sich also die Umwandlungsprodukte übereinander auf, die Spitze bilden die Endprodukte \ddot{u}_n und \ddot{u}_{n+1} . Nach Schluß des Originalimpulses setzen sich die Produkte \ddot{u}_1 bis \ddot{u}_n weiter in die Restprodukte um, so daß in unserem Beispiel nach einer Zeit von $6T_s$ nur noch Restprodukte vorhanden sind, die unter Annahme der Dämpfung o kontinuierlich weiterklingen. In Wirklichkeit entsteht durch die Dämpfung ein

Abb. 9 Schematische Darstellung der Wirkungsweise bei mehrfacher Frequenzumsetzung $T_s < T$.



abklingender Vorgang, der je nach dem Dämpfungsdekrement schneller oder langsamer ausschwingt.

Teil 6 der Schallplatte zeigt ein Beispiel einer solchen Aufstockung der Umsetzungsprodukte.

Es gelten folgende Einstellungswerte:

Transponierungsverhältnis	$V_A/V_W = 2$
Dauer des Originaltones	$T \approx 6 \text{ sec}$
Verstimmung	$\Delta\Omega = \text{verschiedene negative Werte}$
Speicherzeit	$T_s \approx 0,2 \text{ sec}$

Als Originalklang wurden nacheinander verschiedene Trompetentöne von ca. 6 sec. Dauer verwendet. Das Hörbild zeigt, daß in manchen Fällen mehrstimmige bläserartige Klänge entstehen können. Der Zusammenklang aller Umsetzungsprodukte liefert somit unter bestimmten Bedingungen keinen einheitlichen Klang, sondern ein Klanggemisch, bei dem bestimmte Komponenten als Eigentöne hervortreten. Es darf angenommen werden, daß bei der Übereinanderschichtung mehrerer Umsetzungsprodukte vor allem dann gehörmäßig tonale Schwerpunkte gebildet werden, wenn die Formantfrequenzen des Originalklanges nahe an ein ganzzahliges Vielfaches der Verstimmung $|\Delta\Omega|$ herankommen. Das Spektralbild eines solchen vielschichtigen Klanges erlaubt nicht ohne weiteres Rückschlüsse auf den zu erwartenden Höreindruck, denn es spielen natürlich auch Verdeckungseffekte und die physiologischen Höreigenschaften, die in den von Fletcher und Munson aufgestellten Hörkurven zum Ausdruck kommen, eine große Rolle.

Im Folgenden soll die spektrale Zusammensetzung der Endprodukte, die bei mehrfacher Frequenzumsetzung eines einfach aufgebauten Klanges entstehen, näher untersucht werden. Zur Erläuterung wird ein Zahlenbeispiel gewählt: der Originalklang ist gegeben durch die Frequenzen $\nu_1 = 100 \text{ Hz}$, $\nu_2 = 200 \text{ Hz}$, ... $\nu_9 = 900 \text{ Hz}$, die Verstimmung ist $\Delta\Omega = -86 \text{ Hz}$.

Aus dem Schema der Abb. 10 läßt sich folgendes Bildungsgesetz für die Endprodukte erkennen:

Abb. 10 Schema zur Ermittlung der Endprodukte aus einem vorgegebenen Originalspektrum.

$\Delta\Omega = -86 \text{ Hz}$										
ν_1	ν_2	ν_3	ν_4	ν_5	ν_6	ν_7	ν_8	ν_9	[Hz]	Original
100	200	300	400	500	600	700	800	900		
14										f_i
72	28									$f_i^{(2)}$
14	58	42								$f_i^{(3)}$
72	28	44	56							$f_i^{(4)}$
14	58	42	30	70						$f_i^{(5)}$
72	28	44	56	16	84					$f_i^{(6)}$
14	58	42	30	70	2	98				$f_i^{(7)}$
72	28	44	56	16	84	12				$f_i^{(8)}$
14	58	42	30	70	2	74	26			$f_i^{(9)}$
72	28	44	56	16	84	12	60	40		Endprodukte \tilde{u}_n
14	58	42	30	70	2	74	26	46		\tilde{u}_{n+1}

- Man bilde von der Komponente ν_1 so viele Umsetzungen, bis das erste Endprodukt $f_1^{(n)} < |\Delta\Omega|$ erreicht wird. Es ist: $f_1^{(n)} = 100 \text{ Hz} - 86 \text{ Hz} = 14 \text{ Hz}$.
- Die Endprodukte der höheren Harmonischen ν_i sind dann gegeben durch die Reihe $14 + n \cdot 14$, $n = 1, 2, 3$, usw. Man schreibe die Zahlen dieser Reihe untereinander, jedoch jeweils um eine Spalte nach rechts versetzt.
- Das Verfahren wird so lange fortgesetzt, bis sich eine Komponente $f^{(m)} > |\Delta\Omega|$ ergibt. In dem genannten Beispiel ist dies die Komponente $f_7^{(7)} = 98 \text{ Hz}$. In der gleichen Spalte schreibe man dann unter diese Komponente das nächste Umsetzungsprodukt $f_7^{(8)}$. In dem Zahlenbeispiel ist: $f_7^{(8)} = f_7^{(7)} - |\Delta\Omega| = 98 \text{ Hz} - 86 \text{ Hz} = 12 \text{ Hz}$. Man erhält nun weitere Endprodukte nach dem unter 2. beschriebenen Verfahren, wobei die Zahlenwerte sich aus der Formel $12 + n \cdot 14$, $n = 1, 2, 3, \dots$ berechnen. Das unter 2. und 3. beschriebene Verfahren ist so

lange fortzusetzen, bis über sämtliche Spalten hinweg die ersten Endprodukte von jeder Harmonischen ν_i gebildet sind. Die zweiten Umsetzungsprodukte ergeben sich dann jeweils durch eine weitere Umsetzung: $f_i^{(n+1)} = |\Delta\Omega| - f_i^n$.

So ergeben sich schließlich die beiden Endprodukte des Gesamtspektrums \ddot{u}_n und \ddot{u}_{n+1} .

Weiterhin lassen sich folgende Aussagen über die spektrale Zusammensetzung der Endprodukte ableiten:

Harmonische Klänge ergeben Endprodukte mit harmonischen Komponenten, wenn die Verstimmung $|\Delta\Omega|$ mit irgend einem Frequenzwert der Harmonischen $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m$ zusammentrifft. Diese harmonischen Komponenten der Endprodukte sind identisch mit den zwischen 0 Hz und der Verstimmungsfrequenz $|\Delta\Omega|$ Hz liegenden Komponenten $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m$ des Originalspektrums. Für den Fall, daß $|\Delta\Omega| = \nu_1$ ist, wird ein Endprodukt identisch mit der Frequenz ν_1 , das andere ist 0, d. h. es gelingt durch die mehrfache Frequenzumsetzung bei einem Klang, der aus Grund- und Obertönen besteht, durch passende Wahl von $|\Delta\Omega| = \nu_1$ die gesamten Komponenten auf die Grundfrequenz ν_1 umzusetzen.

Für jede andere negative Verstimmung $-\Delta\Omega$ lassen sich die Komponenten der beiden Endprodukte auf eine virtuelle Grundschwingung f_v beziehen. Der Zahlenwert von f_v ist identisch mit dem größten gemeinschaftlichen Faktor zwischen der Verstimmung $|\Delta\Omega|$ und der Grundschwingung ν_1 . In dem vorliegenden Beispiel ist der größte gemeinschaftliche Faktor von $|\Delta\Omega| = 86$ Hz und $\nu_1 = 100$ Hz gleich 2. Der Faktor $\Delta\Omega/f_v$ bestimmt die Zahl der möglichen Komponenten im Endprodukt, d. h. für $f_v = 2$ Hz und $|\Delta\Omega| = 86$ Hz können $86/2 = 43$ Harmonische im Endprodukt auftreten. Da aber im allgemeinen $\Delta\Omega/f_v > n$ ist, wobei n die Ordnungszahl der höchsten Harmonischen im Originalklang $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$ bedeuten möge, können im vorliegenden Beispiel für $n = 9$ nur 9 der möglichen 43 Komponenten in einem Endpunkt belegt werden. Alle anderen werden ausgelassen. Es gelten dafür bestimmte Bildungsgesetze, die hier nicht näher erörtert werden sollen. Ist dagegen $\Delta\Omega/f_v < n$, so wird die Zahl der im Endprodukt auftretenden Komponenten kleiner als die Anzahl der Harmonischen im Originalspektrum. Es wird die gleiche Frequenz mehrmals durch die abgebauten Komponenten belegt. Die beiden Endprodukte sind im allgemeinen geräuschartige Klänge, die sich aber in ihrer Klangfarbe unterscheiden.

Zum Abschluß soll noch auf einige metrische und rhythmische Eigenschaften der durch Iteration und Frequenzumsetzung erzeugten Klangfolgen hingewiesen werden. Im allgemeinen ist durch die eingeschaltete Dämpfung im Rückkopplungskreis das Originalspektrum $\Sigma \nu_i = \ddot{u}_0$ am stärksten ausgeprägt. Die folgenden Umsetzungsprodukte \ddot{u}_1, \ddot{u}_2 usw. sind in ihrer Intensität schwächer. Wird nun, wie bereits beschrieben, während des Ablaufes der Frequenzumsetzung des ersten Impulses ein zweiter Impuls gegeben, so überlagern sich die Umsetzungsprodukte beider Impulse, ein Vorgang, der durch weitere Impulse noch erweitert werden kann. Da alle Originalimpulse am stärksten akzentuiert sind, treten rhythmische

Abb. 11 a-e Beispiele für verschiedene rhythmische und klangliche Anordnungen der umgesetzten Produkte.

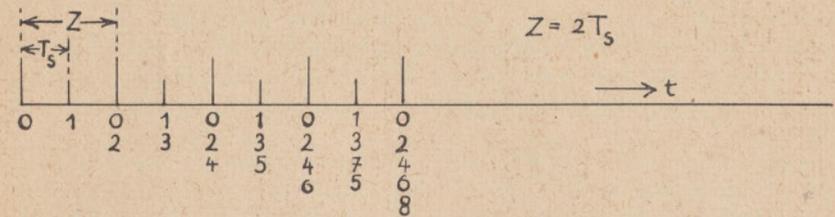


Abb. 11b

$$Z = 0,5 T_s$$

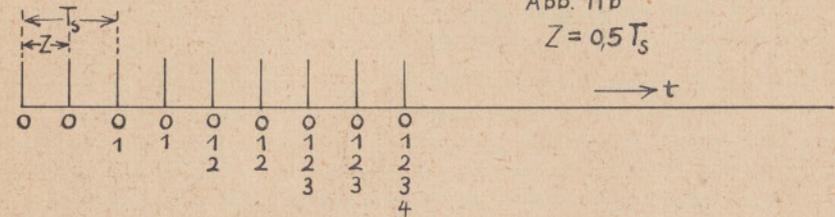


Abb. 11c

$$Z = 1,5 T_s$$

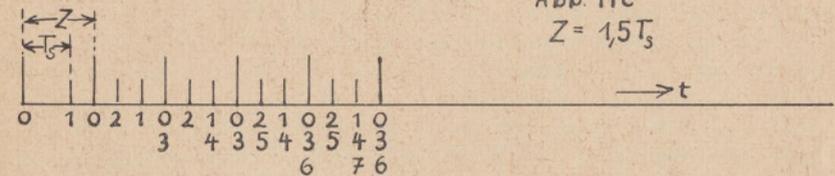


Abb. 11d

$$Z = T_s$$

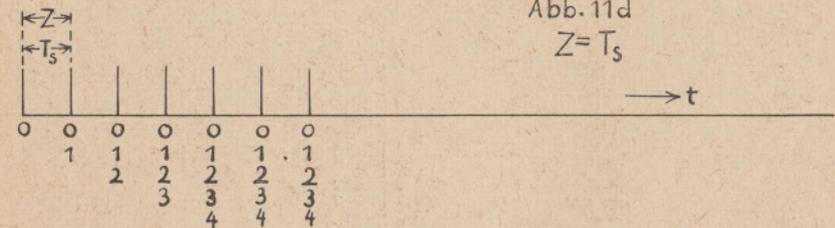


Abb. 11e

$$Z = 0,9 T_s$$



Auf der Ordinate sind die Umsetzungsprodukte \ddot{u}_i aufgetragen.

Gruppierungen auf, die einmal durch die Impulsfolgefrequenz $1/Z$, d. h. die Zahl der pro Zeiteinheit dem Frequenzumsetzer zugeführten Originalimpulse (betonte Taktteile), zum anderen aber durch das Metrum $M = 1/T_s$, d. h. die Zahl der pro Zeiteinheit erzeugten Impulse infolge Iteration über das Magnetofon mit der Speicherzeit T_s (unbetonte Taktteile), gegeben sind. Abb. 11 gibt einige Beispiele für die auftretenden Möglichkeiten. Der Einfachheit halber sind sehr kurze Impulsdauern angenommen ($T \ll T_s$), die durch einen einfachen Strich gekennzeichnet sind.

Abgesehen von der verschiedenartigen rhythmischen Struktur lassen sich auch die gleichzeitig erklingenden Umwandlungsprodukte der einzelnen Impulse nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten ordnen. Im Falle $Z = 2T_s$ (s. Abb. 11a) ordnen sich gleichmäßig alle geradzahigen bzw. ungeradzahigen Umsetzungsprodukte, für $Z = 3T_s$ und für $Z = 4T_s$ entstehen andere Kombinationen u. s. f.

Aus Abb. 11b ist zu ersehen, daß für $Z = 0,5T_s$ je zwei unmittelbar im Abstand $0,5T_s$ aufeinanderfolgende Umsetzungsprodukte identisch sind, während für $Z = 1,5T_s$ je zwei im Abstand $1,5T_s$ aufeinanderfolgende Umsetzungsprodukte identisch sind (Abb. 11c). Es entsteht also neben der rhythmischen Akzentuierung auch eine klangliche Ordnung der zusammenklingenden Umsetzungsprodukte.

Macht man $Z = T_s$ (s. Abb. 11d), so erhält man eine Übereinanderschichtung sämtlicher Umsetzungsprodukte, analog zu dem Fall $T \gg T_s$ (s. Abb. 9). Es gelingt, diese vertikale Übereinanderschichtung in ein horizontales Nacheinander abzuwandeln, indem man die beiden Zeiten Z und T_s nicht genau identisch macht. Abb. 11e zeigt eine solche Klangfolge für den Fall $Z = 0,9T_s$.

Teil 7 und Teil 8 der Schallplatte bringen Beispiele für verschiedene rhythmische Strukturen solcher Klangfolgen. Die Originalimpulse wurden auf einem Vibraphon bzw. Xylophon erzeugt.

Zusammenfassend darf hervorgehoben werden, daß sich das Prinzip der Frequenzumsetzung mit dem Prinzip der Iteration zu einer einheitlichen Methode zusammenfügt, die es gestattet, Originalklänge in neue Tongebilde umzusetzen und gleichzeitig rhythmisch zu ordnen. Die gezeigten Möglichkeiten und Erklärungen umreißen nur einen Teil der klanglichen Erscheinungen. Zu ihrer eindeutigen Klärung müssen noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden, besonders auf dem Gebiet des subjektiven Klangeindrucks.

SCHRIFTTUM

A Elektronische Musik:

1. Sonderheft: Elektronische Musik — Technische Hausmitteilungen des Nordwestdeutschen Rundfunks 1954 — Beiträge von Fritz Enkel, Heinz Schütz und Werner Meyer-Eppler
2. H. Olson und H. Belar: Electronic Music Synthesizer — The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 27 Number 3, Mai 1955

B Musique concrète:

3. Pierre Schaeffer: A la Recherche d'une musique concrète — Editions du Seuil 1952, Paris
4. J. Poullin: Musique concrète — Klangstruktur der Musik — Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik, Berlin 1955
5. J. Poullin: Von der musikalischen Transmutation zur Klangprojektion aufgenommener Schallvorgänge. — Gravesano, Ars=Viva=Verlag Mainz, Juli 1955

C Multiplikative Mischung:

6. W. Meyer-Eppler: Elektronische Musik. — Ihre stofflichen und informationstheoretischen Grundlagen. — Klangstruktur der Musik — Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik Berlin 1955
7. F. Enkel: Sonderheft Elektronische Musik (siehe 1)
8. W. Meyer-Eppler: Elektronische Klangerzeugung — Ferd. Dümmler Verlag, Bonn, 1949
9. W. Meyer-Eppler: Die elektrischen Instrumente und neue Tendenzen der elektroakustischen Klanggestaltung Gravesano, Ars=Viva=Verlag Mainz 1955

D Frequenzumsetzung:

10. F. Filbig: Lehrbuch der Hochfrequenztechnik — Akademische Verlagsgesellschaft Berker & Erler Kom. Ges. Leipzig
11. J. Wallot: Theorie der Schwachstromtechnik — Springer Verlag Berlin
12. L. Heck und F. Bürck: Klangumformungen in der Rundfunkstudioteknik, insbesondere durch Anwendung der Frequenzumsetzung Zeitschrift: Elektronische Rundschau 1956

E Iteration (Künstlicher Nachhall):

13. W. Meyer-Eppler: Elektronische Musik (siehe 6)
14. W. Meyer-Eppler: Die Messung und Hörbarmachung sehr kleiner Dämpfungs- und Phasenverzerrungen — NWDR=Hausmitteilungen 1951, Nr. 5
15. K. E. Gondesens: Ein Iterationsgerät zur verstärkten Wiedergabe von Verzerrungen — NWDR=Hausmitteilungen 1951, Nr. 5
16. H. Schießer: Einrichtungen zur Erzeugung künstlichen Nachhalls Mitteilungen aus dem Rundfunktechnischen Institut Nürnberg Funk und Ton 1954, Nr. 7

Zusammenstellung der auf der Schallplatte niedergelegten Beispiele

(Abspielgeschwindigkeit 38 cm/sec) Abspielzeit

Die einzelnen Teile sind durch Pausen getrennt.

Teil 1: Produkte der 1. Klangumsetzung.

Beispiel a) 1. Klangumwandlung einer Klavierstimme

Beispiel b) 1. Klangumwandlung einer Cembalostimme

Beispiel c) 1. Klangumwandlung einer Harfenstimme

Teil 2: Produkte der 1. Klangumsetzung, unter gleichzeitiger Verwendung der Transponierung.

Zweistimmige Führung

Oberstimme: 1. Klangumsetzung einer Cembaphonstimme

Unterstimme: 1. Klangumsetzung einer Klavierstimme

2 Beispiele für verschiedene Einstellungswerte

Teil 3: Produkte der 1. Klangumwandlung.

Beispiel a) Original chromatische Tonleiter auf dem Klavier

Beispiel b) 1. Klangumsetzung einer Klaviertonleiter

Teil 4: Produkte mehrfacher Klangumsetzung.

Beispiel a) Tonleiter abwärts (Original Geigenpizzicato)

Beispiel b) Tonleiter aufwärts (Original Geigenpizzicato)

Beispiel c) Tonkaskade (Original Geigenpizzicato)

Beispiel d) Tonleiter abwärts (Original Flöte)

Teil 5: Produkte mehrfacher Klangumsetzung — Klavier

Teil 6: Produkte mehrfacher Klangumsetzung — Trompete

Teil 7: Produkte mehrfacher Klangumsetzung einzelner Vibraphontöne
Verschiedene Rhythmen

Teil 8: Produkte mehrfacher Klangumsetzung einzelner Xylophontöne
Verschiedene Rhythmen.

Die Erregung von Eigentönen gedämpfter Räume durch kurzzeitige Impulse*

DR. J. CAPEK, WIEN

Der Begriff der „guten Akustik“, wie ihn der Musiker und der Konzertbesucher als subjektiv erlebtes Kriterium eines Raumes auffassen, ist für den Physiker in eine Reihe von Komponenten aufgesplittet und erweist sich immer deutlicher als ein Komplex von Bedingungen, deren Rangordnung und Vollständigkeit heute kaum schon eindeutig festzulegen sind. Nur in den ersten Entwicklungsjahren der Raumakustik glaubte man, die Nachhallzeit allein sei für die Hörsamkeit maßgebend. Später erkannte man den Einfluß der lokalen Energiedichteverteilung und die Bedeutung, die das Verhältnis der direkten zur diffus verteilten Energie für die Klangwirkung besitzt.¹⁾ Schließlich hat HAAS²⁾ die besondere Wichtigkeit der in den ersten 50 ms beim Hörer eintreffenden Schallrückwürfe klargestellt. Diese Feststellungen beziehen sich auf Schallimpulse und sind nur möglich geworden, sobald man sich von dem Ausgangspunkt der ersten theoretischen Untersuchungen, dem gleichmäßig und stationär mit Schallenergie gefüllten Raum (Gleichgewicht zwischen Energiezufuhr und Energie-Absorption) freigemacht hat. Tatsächlich wird dieser stationäre Fall auch bei den natürlichen Klangquellen Musik und Sprache kaum jemals vorliegen, es wird, in der Ausdrucksweise der Schwingungslehre, kein „eingeschwungener Zustand“ erreicht.

Zum tieferen Verständnis raumakustischer Probleme wird man demnach von den Vorgängen ausgehen müssen, die als Folge kurzzeitiger Impulserregungen auftreten. Damit scheidet zunächst die sog. „statistische Raumakustik“ aus, denn sie setzt eine „allseitig-gleichmäßige“ Schallverteilung voraus,³⁾ in ihren Gleichungen kommen die Ortskoordinaten überhaupt nicht vor. Diese Gleichungen wären für die Impulsausarbeitung nur unter der Annahme brauchbar, daß auch die Schallquelle gleichmäßig-diffus über den ganzen Raum verteilt sei, was praktisch nicht vorkommt.

Hingegen erweist sich die „geometrische Methode“, die Verfolgung des Weges, den die Impulse bei den Reflexionen an den Raumbegrenzungsflächen zurücklegen, hier als sehr fruchtbar. Sie gestattet das Studium der Zeitfolge, mit der die Impulse an irgendeinem Punkt des Raumes eintreffen, zumindest für das wichtige erste Zeitintervall. Für alle Arbeiten auf der Grundlage geometrischer Betrachtungsweise ist es charakteristisch, daß sie Methoden liefern, die, wenn auch in umständlich-mühevoller Weise, einen konkreten Einzelfall zu untersuchen ge-

* Der hier vorliegende Bericht stellt einen gekürzten Auszug aus der Dissertation des Verfassers dar, an den sich Interessenten wegen eingehender Einzelheiten gegebenenfalls wenden mögen.

1 Siehe die kurze Zusammenfassung dieser Entwicklung bei v. Braunmühl in „Gravesano“, S. 9 bis 12 (Ars viva Verlag G. m. b. H. Mainz 1955)

2 H. Haas, *Acoustica* 1 (1951), S. 49

3 Siehe z. B. H. u. L. Cremer: *Akust. Zeitschr.* 2 (1937)

statten, aber wenig allgemein-theoretische Erkenntnisse gewinnen lassen. Eine Ausnahme bildet die Arbeit von MAYO⁴⁾, der die punktförmig gedachte Schallquelle an den Raumwänden wiederholt spiegelt und so zu einem räumlichen Punktgitter von Spiegelbildern kommt, welches die Gesamtheit aller möglichen Reflexionen ersetzt, wenn man jeden Gitterpunkt konphas mit der Quelle Schallenergie emittieren läßt. Bestimmte Gruppen von Punkten, die (im Falle des Rechteckraumes) auf Geraden oder auf Ebenen liegen, lassen sich dann, wie MAYO zeigt, wirkungsmäßig zusammenfassen.

Diese Methode kann aber naturgemäß nur für ungedämpfte Räume strenge Gültigkeit haben, denn nur dann ist die Gleichphasigkeit der Spiegelbild-Quellen gegeben, während bei der Reflexion an einer schallschluckenden Fläche ein Phasensprung auftritt. Wenn man, wie dies MAYO tut, gleichzeitig einen Energieverlust bei der Reflexion und ein ungestörtes Bildpunktgitter annimmt, so können die Ergebnisse nur den Charakter einer für kleine Dämpfungen gültigen Näherungsbetrachtung beanspruchen.

Es ist bekannt, daß eine wirklich exakte Erfassung raumakustischer Probleme nur mit Hilfe der wellentheoretischen Betrachtungsweise möglich ist, wie sie insbesondere von den amerikanischen Physikern MORSE, BOLT und BERANEK entwickelt wurde. Leider sind die mathematischen Schwierigkeiten dieser Methode, welche von der Lösung der Wellengleichung ausgeht, bei gedämpften Räumen wegen der sehr komplizierten Form der Randbedingungen erheblich. Gilt dies schon für die Betrachtung stationärer Zustände, so wird die Rechnung noch unübersichtlicher, wenn man die Ein- und Ausschwingvorgänge untersuchen will.

Im folgenden soll daher nur eine Diskussion der wichtigsten Resultate einer größeren theoretischen Arbeit gebracht werden, in der auf wellentheoretischer Grundlage versucht wurde, den zeitlichen Schalldruckverlauf an einer beliebigen Stelle eines gedämpften Rechteckraumes zu ermitteln, der sich — als Folge einer Schallerregung beliebigen Zeitverlaufes an einer anderen Stelle des Raumes — ergibt. Das Ergebnis der allgemeinen, die Arbeiten von MORSE und BOLT⁵⁾ benützenden Rechnung ist ein Ausdruck für das Schnellepotential $\varphi(x, y, z, t)$, der allerdings keinen geschlossenen Ausdruck darstellt, sondern eine Summe über sämtliche Eigenschwingungen des Raumes. Die gewonnene allgemeine Formel wurde auf drei Spezialfälle impulsförmiger Schallerregung angewendet und zwar auf

1. einen Rechteckimpuls (Gleichdruckstoß) der Dauer T_1
2. einen sinusförmigen Impuls begrenzter Zeitdauer T_1
3. einen Knallvorgang, bei dem der von CREMER⁶⁾ angegebene Quellschalldruckverlauf zugrunde gelegt wurde.

Die wichtigsten Ergebnisse für diese drei Spezialfälle sollen im folgenden näher besprochen werden, wobei auf die Wiedergabe der teilweise umständlichen For-

4 C. G. Mayo: Acoustica 2 (1952)

5 P. M. Morse und R. H. Bolt: Rev. of modern Phys., Vol. 16, (1944)

6 L. Cremer: Akust. Zeitschr. 5 (1940)

meln verzichtet und lediglich die Kurvendarstellung benutzt wird. Um Mißverständnissen vorzubeugen, muß darauf hingewiesen werden, daß die in jedem Fall einer räumlich begrenzten und an einer Stelle $P_0(x_0, y_0, z_0)$ des Raumes lokalisierten Schallquelle vorliegende Ortsabhängigkeit des Schalldruckes sowohl von den Koordinaten des betrachteten Aufpunktes $P(x, y, z)$ als auch von P_0 nicht Gegenstand der nachstehenden Überlegungen ist. Diese beschränken sich darauf, die Abhängigkeit der durch Impulse erregten Eigentonalamplituden von den charakteristischen Impulsgrößen zu besprechen. Die den Kurven zu entnehmenden Werte der Schalldruckamplituden wären daher noch mit einem Faktor $F(x_0, y_0, z_0, x, y, z)$ zu multiplizieren, der die Ortsabhängigkeit berücksichtigt.

1. Rechteckstoß

Dieser Fall ist physikalisch durch eine kurze ($0 \leq t \leq T_1$) konstante Luftpfeinströmung im Quellpunkt charakterisiert.

Für die Anregung der Eigenwellen sind die beiden Impulsflanken maßgebend, und zwar sind die erregten Eigenfrequenz-Schalldruckamplituden der Frequenz verkehrt proportional, die tiefsten Eigenfrequenzen treten am stärksten in Erscheinung. Da wir kurze Impulsdauer T_1 (im Vergleich zur Nachhallzeit) angenommen haben, interessieren vor allem die nach dem Impuls ($t > T_1$) vorhandenen Anfangsamplituden, die — jede mit der Dämpfung der betreffenden Eigenfrequenz — abklingen. Die Kurven der *Abbildung 1* lassen diese Anfangsamplituden

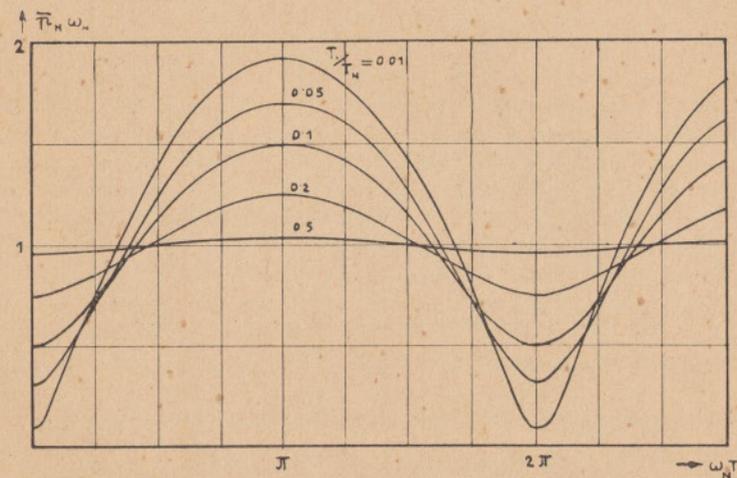


Abb. 1 Anfangsamplitude bei Rechteck-Impuls. (Ordinate mit ω_N multipliziert)

in einer Parameterdarstellung erkennen, wobei auf der Abszisse das Produkt: Eigenfrequenz $\omega_N \times$ Impulsdauer T_1 und auf der Ordinate das Produkt: Schalldruckamplitude $p_N \times$ Eigenfrequenz ω_N aufgetragen ist (ω ist die Kreisfrequenz

$2\pi\nu$). Die Kurven sind für verschiedene Werte des Verhältnisses : Impulsdauer zu Nachhallzeit gezeichnet. Man erkennt, daß bei einer Impulsdauer von mehr als 50% der Nachhallzeit das Produkt $p_N \cdot \omega_N$ praktisch konstant bleibt, d. h. die Amplituden der Eigenfrequenz verkehrt proportional sind. Je kürzer aber die Impulsdauer wird, desto stärker macht sich außerdem der Einfluß des Produktes $\omega_N T_i$ bemerkbar, in dem Sinne, daß die Frequenzen, für die $\omega_N T_i = (2n + 1) \pi$, $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ ist, maximal erregt werden, hingegen jene, für die $\omega_N T_i = 2n \pi$, $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ gilt, am schwächsten ausgeprägt sind. Dies bedeutet, daß bei sehr kurzen Impulsen $T_i \ll T_N$ eine selektive Anregung bestimmter Eigentöne zu erwarten ist, während andere fast völlig unterdrückt sind. Allgemein gilt dabei, daß vorwiegend die tiefen Eigentöne auftreten, zwischen denen, speziell bei kleineren Räumen, relativ größere Intervalle liegen, so daß der Ausfall einzelner Eigentöne besonders merkbar wird.

2. Sinusimpuls begrenzter Dauer T_i

Hier ergibt die Rechnung für $t < T_i$, also für Zeiten innerhalb der Impulsdauer die Überlagerung der erzwungenen stationären Schwingung mit einem flüchtigen

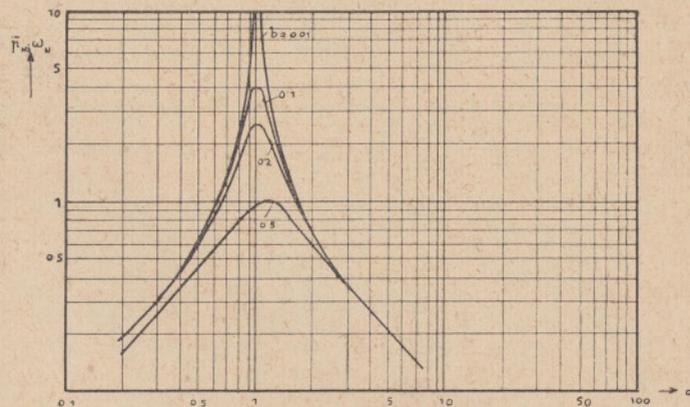


Abb. 2 Stationäre Schalldruckamplitude bei harmonischer Erregung. (Ordinate mit ω_N multipliziert)

Ausgleichsvorgang. *Abbildung 2* stellt die stationäre Amplitude \bar{p}_{NS} für verschiedene Dämpfungen in der Form dar, daß auf der Abszisse $a = \frac{\omega}{\omega_N}$, auf der Ordinate das Produkt $\bar{p}_{NS} \omega_N$ aufgetragen ist. ω ist die Kreisfrequenz der Schallquelle, ω_N wieder die des betrachteten Eigentones. Als Dämpfungsparameter ist das Verhältnis $b = \frac{\beta_N}{\omega_N}$ gewählt, wobei β_N der Dämpfungsexponent des Eigentones ist. Die Kurven (nur für kleine Dämpfungen streng gültig) zeigen das bekannte Reso-

nanzphänomen, das beim Zusammenfallen einer Eigenfrequenz mit der Erregerfrequenz auftritt.

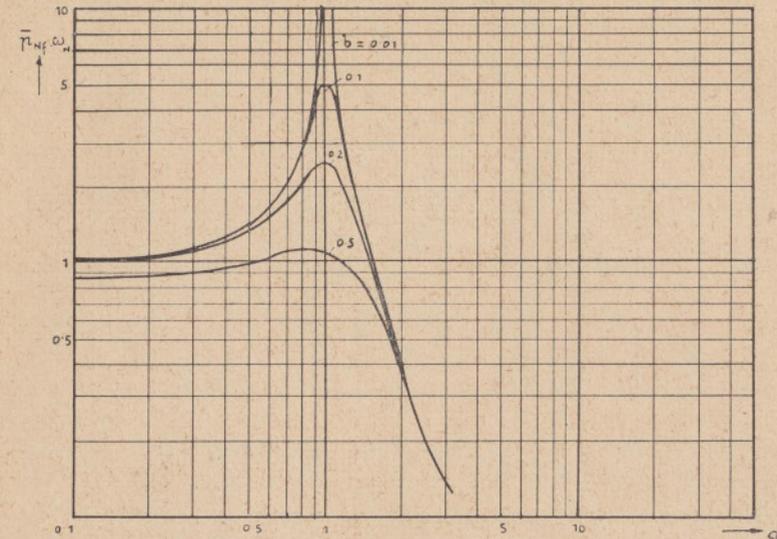


Abb. 3 Schalldruck-Anfangsamplitude, hervorgerufen durch plötzlichen Einsatz eines Sinusimpulses (Ordinate ist mit ω_N multipliziert)

Abbildung 3 gibt in analoger Darstellung die Anfangsamplitude \bar{p}_{NF} des flüchtigen Ausgleichsvorganges. Für das Verhältnis $\frac{\bar{p}_{NF}}{\bar{p}_{NS}}$ ergibt die Rechnung den Näherungswert $\omega_N : \omega$, d. h. in Worten: Die in schwach gedämpften Räumen beim plötzlichen Einsetzen einer sinusförmigen Erregung auftretenden Eigen-ton-Ausgleichsvorgänge haben Anfangsamplituden, die sich zu der stationären Amplitude der erzwungenen Schwingung verhalten wie die betrachtete Eigenfrequenz zur Erregerfrequenz. Praktisch bedeutet dies, daß beim „Einschwingen“ des Raumes vornehmlich die über der Erregerfrequenz liegenden Eigenfrequenzen eine Rolle spielen. Es wäre interessant festzustellen, ob diesbezügliche Beobachtungen vorliegen, daß etwa tief liegende Musikinstrumente deutlichere Einschwingerscheinungen in halligen Räumen zeigen als hoch abgestimmte.

Für $t > T_i$, also nach Aufhören des Impulses, klingen die freien Eigenschwingungen ω_N exponentiell ab, jede mit ihrer Dämpfung β_N . Die Anfangsamplituden hängen aber von der Abschaltphase ab und können dabei alle zwischen zwei Extremwerten $C_{max.}$ und $C_{min.}$ liegenden Werte annehmen. Dies zeigt die *Abb. 4*, in welcher die Extremwerte eingetragen sind, und zwar für die beiden Grenzfälle ∞ und 0 des Verhältnisses Impulsdauer : Nachhallzeit. Für die Abszisse gilt dasselbe wie bei *Abb. 2* und *3*, für $b = \frac{\beta_N}{\omega_N}$ ist der spezielle Wert $0,2$ gewählt. Der

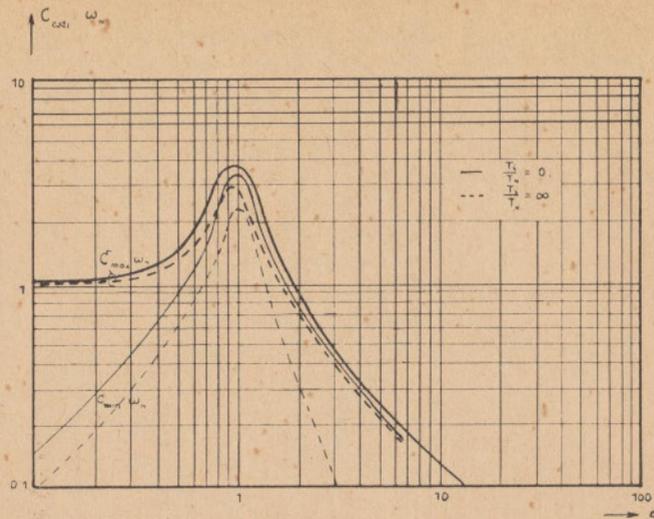


Abb. 4 Anfangsamplitude des Nachhallvorganges bei Erregung durch einen Sinus-Impuls ($b = 0,2$ (Ordinate mit ω_N multipliziert)

Kurvenverlauf zeigt, daß der Einfluß der Abschaltphase (Unterschied zwischen $C_{\max.}$ und $C_{\min.}$) im Resonanzfall am kleinsten ist, aber für die von der Erregerfrequenz weiter entfernten Eigenfrequenzen in zunehmendem Maße eine Rolle spielt. Die Impulsdauer hat auf den Verlauf der Kurven keinen entscheidenden Einfluß. Nur bei Impulsen, die im Verhältnis zur Nachhallzeit sehr kurz sind, werden die Amplituden etwas größer, vor allem jene der Eigenfrequenzen, die tief unterhalb der Erregerfrequenz liegen. Die Resonanzschärfe, sowohl der Einschwingvorgänge, des stationären Zustandes, wie des Nachhalles wächst mit kleiner werdendem $b = \frac{\beta N}{\omega_N}$, d. h. bei gleicher Nachhallzeit mit zunehmender Frequenz.

Zur Orientierung über die Größenordnungen der Parameter a und b sei daran erinnert, daß der Hörbereich des menschlichen Ohres ω -Werten von etwa 10^2 bis 10^5 sec^{-1} entspricht. Die Nachhallzeiten üblicher Räume liegen zwischen ca. 0,2 und 10 sec. Daraus ergeben sich die praktisch interessierenden Wertbereiche:

$$a = 10^{-3} \text{ bis } 10^3$$

$$b = 0,17 \text{ bis } 7 \cdot 10^{-6}$$

3. Knall-Impuls

Knall-Impulse werden vor allem in der akustischen Meßtechnik verwendet, zurückgehend auf eine Anregung V. BEKESY'S.⁷⁾ Später hat dann WEBER⁸⁾ das Frequenzspektrum von Knallen theoretisch und experimentell untersucht, wäh-

⁷ G. V. Békésy: Akust. Zeitschr. 3 (1937)

⁸ W. Weber: Akust. Zeitschr. 4 (1939)

rend CREMER⁶⁾ ein einfaches elektrisches Ersatzschema für den Knall angab und daraus den Zeitverlauf und das Frequenzspektrum errechnete. Die Ergebnisse der letztgenannten Arbeit würden im folgenden für die Ermittlung der durch einen Knall angeregten Eigentöne benutzt. Die Erregung ist durch eine stark gedämpfte, nahezu aperiodische Schwingung gegeben, deren Kreisfrequenz ω_q umso tiefer liegt, je größer die Knallenergie ist. Diese erzwungene Schwingung verschwindet sehr schnell, während die angeregten Eigenfrequenzen des Raumes langsamer abklingen. Die Anfangsamplituden \bar{p}_{Nf} der Eigentöne sind

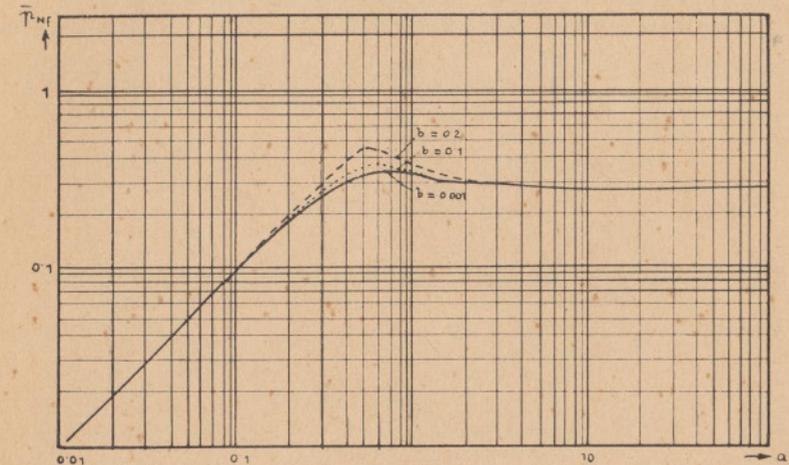


Abb. 5 Anfangsamplitude des Nachhallvorganges bei Erregung durch einen Knall

in Abbildung 5 als Funktion des Verhältnisses $a = \frac{\omega_q}{\omega_N}$ dargestellt, und zwar für

verschiedene Werte des Parameters $b = \frac{\beta N}{\omega_N}$. Man entnimmt den Kurven, daß die Größe von b nur im Bereiche $a = 0,2$ bis 1 , wo eine schwach ausgeprägtes Maximum auftritt, einen merklichen Einfluß auf den Kurvenverlauf hat. Bei kleinen Werten von a , also bei Eigenfrequenzen die genügend hoch über der „Knallfrequenz“ liegen ($\omega_N > 2 \omega_q$), fällt die Amplitude ab, für tiefere Eigenfrequenzen ($\omega_N < 2 \omega_q$) bleibt sie konstant. Ähnlich wie bei sehr kurzen Sinus-Impulsen haben wir demnach auch bei der Knallerregung im Nachhall ein Überwiegen der tieferen Eigenfrequenzen zu erwarten.

Fassen wir das Ergebnis der drei betrachteten Impulserregungen zusammen, so ist festzustellen, daß in allen Fällen eine bevorzugte Anregung der tiefen Eigentöne erfolgt. Diese spielen also bei Ausgleichsvorgängen die wichtigste Rolle. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt MAYO in seiner bereits früher zitierten Arbeit auf Grund geometrischer Betrachtungen, also von einer ganz anderen Seite her.

In kleinen Räumen, deren Eigentonpektrum im untersten Frequenzbereich noch nicht sehr dicht besetzt ist, vor allem dann, wenn die Abmessungen so ungünstig sind, daß sich die Eigenfrequenzen an einzelnen Stellen zusammendrängen, sind daher Interferenzen zwischen einzelnen Eigentönen zu erwarten, die zu Rauigkeit des Klangbildes beim Einschwingen und Ausklingen Anlaß geben. Es ist daher gerade im Hinblick auf die nichtstationären Vorgänge notwendig, durch zweckmäßige Wahl der Abmessungen für eine möglichst gleichmäßige Eigentonteilung im Bereiche tiefer Frequenzen Sorge zu tragen.

Aus dem Inventar des Experimentalstudios Gravesano

1. Magnetophone:	2 M 5 1 350 P (3 spurig, stereophon)	TELEFUNKEN AMPEX
2. Mikrophone:	10 Neumann M49 (3fäch) 4 M 400 1 Kristall 1 Kristallmikrophonkapsel	TELEFUNKEN PEIKER
3. Lautsprecher:	2 Abhörschränke (4 Hoch + 2 Tief) 3 Allvox 3 (Komandoanlage) 2 Hochton 1 (40 Ohm)	TELEFUNKEN PEIKER GOODMAN
4. Verstärker:	4 V304 10 V72 2 V69 1 PF 91 (Bedienungsgerät PF 91A)	TELEFUNKEN PYE
5. Filter:	3 Entzerrer W68 1 Hörspielverzerrer HV 53 1 Variable Band=Paß 1 Variable Rejection=Filter 1 Random Noise Generator	TELEFUNKEN KROHN=HITE SCOTT
6. Flachbahnregler:	10 W 66	TELEFUNKEN
7. Oscillograph:	mit 2 Strahlen + Camera	COSSOR
8. Meßgeräte:	1 Pegelschreiber + Schwebungssummer 1 Meßmikrofon + Meßverstärker 1 Diodenröhren=Voltmeter	BRÜEHL & KJÆR
9. Abspielapparatur:	High Fidelity	PYE
10. Projektor:	mit Licht- und Magnetton (16)	DIXIE
11. Instrumente:	1 Streichquartett 1 Flügel 1 Piano 1 elektr. Gitarre mit Verstärker 1 elektronische Orgel	SCHMIDT=FLOHR BAYR. APPARATE
12. Leihgaben:	1 Terzfilter (0-60db/94-6250 Hz) (in 24 Stufen regelbar) 1 Oktavfilter (37,5-9600/50-12800) 1 sechsköpfige Nachhallmaschine 1 Hammondorgel Nachhallmaschine	ALBISWERKE SIEMENS ALBISWERKE

Zum Experimentalstudio GRAVESANO gehören 3 Studios und 4 Nachhallräume

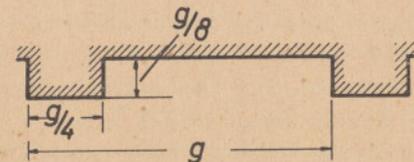
Ergänzungen und Berichtigungen zu Nr. 2/3

Zum Beitrag: „Die Grenzen planmäßiger raumakustischer Gestaltung“

von L. CREMER

*

- Die in dem Beitrag in eckigen Klammern angegebenen Literaturhinweise beziehen sich auf folgende Quellen:
 - Athanasius KIRCHER, Neue Hall- und Thonkunst, Nördlingen 1684.
 - E. MEYER und L. BOHN, Acustica, Beiheft Nr. 4, 1952 (Seite 195).
 - F. SPANDÜCK, Dissertation TH München, sowie Ann. d. Phys. V. 20 (1934), S. 345.
 - W. C. SABINE, Coll. papers Nr. 2, Cambridge 1923.
 - E. MEYER und L. CREMER, Z. f. techn. Phys. 14, S. 500, 1933.
 - L. HECK und H. WESTPHAL, Techn. Hausmitteilungen des NWDR, 7 (1955), S. 40.
 - W. C. SABINE, Coll. papers Nr. 2, Cambridge 1923.
 - G. v. BEKESY, Elektr. Nachrichtentechnik 11, S. 369 (1934).
 - E. MEYER und W. JORDAN, Elektr. Nachrichtentechnik 12, S. 213 (1935).
 - PARKIN, ALLEN, PURKIS, SCHOLES, Acustica 3 (1953), S. 1.
 - W. KUHL, Acustica 4, 1954, S. 618.
 - L. CREMER, Die Schalltechnik 13, S. 1, 1953.
- Das auf Seite 14, 3. Absatz erwähnte Bild einer Rechteck-Kassette wird hier unter der Bezeichnung Bild 5a nachgetragen. Die dort auf Seite 13 gebrachte Abbildung 5 hat hiermit nichts zu tun.



- Auf Seite 11 sind die Bezeichnungen Abbildung 2 und Abbildung 3 zu vertauschen.
- Auf Seite 15 muß es im 3. Absatz zweimal SPANDÜCK, statt SPANDOEK, heißen.
- Die Abbildung 14 stellt die Reflektoren aus Plexiglas im Münchner Herkulesaal dar, von denen auf Seite 32, 3. Absatz die Rede ist.

Zum „Bericht über die erste Stipendiatsperiode“ von Friedrich Trautwein Seite 83 ist die erste Zeile zu ersetzen durch:

führen auf ein wichtiges Thema. Die traditionelle Gesangspädagogik erstrebt den „großen Ton“ der

Seite 84 sind in Fig. 2 die Mikrophone M_1 und M_2 durch eine Gerade zu verbinden (sie sind elektrisch parallelgeschaltet).

Seite 85, Abschnitt B, ist der zweite Satz zu ersetzen durch:

Der maßgebende Gesichtspunkt ist dabei die Erfahrung, daß der im Raum vom Gehör aufgenommene charakteristische chorische Effekt bei der einkanaligen Schallaufzeichnung weitgehend verloren geht.

Seite 86 ist in Zeile 21 von oben hinter „Vorrichtung“ einzufügen:
(auf dem Bild Seite 85, links) . . .

Seite 88 am Ende des ersten Absatzes muß es heißen statt „RWC“: $R\omega C$

Seite 88, Fig. 4, muß die Spitze des rechtwinkligen Dreiecks auf der Kreis-
peripherie liegen.

Seite 88 erste Zeile nach Fig. 4 muß es heißen statt „RWC“: $R\omega C$

Seite 88, Zeile 6 von unten ist hinter „Änderungen“ einzufügen: der Phase

Seite 90, Abschnitt 2, ist am Ende des 2. Absatzes, hinter „bleiben.“ einzufügen:
Durch Stimmentrennung kann man Differenztöne vermeiden.

Seite 90 lautet der Satz nach dieser Einfügung:

Erst zum Schneiden der Ur-Schallplatte sollten die Spuren . . .

Seite 91, Zeile 7 von oben ist hinter „Stimmentrennungsprinzip“ einzufügen:
zunächst

Seite 91, Zeilen 7 und 6 von unten ist statt „erhöht worden“ zu setzen:
im ganzen Verlauf merklicher geworden

Seite 93 ist vor Beginn des zweiten Abschnittes, also vor „Diese Klänge“ folgen-
der Satz einzufügen:

Weitere Untersuchungen galten den Anschlagklängen.

Seite 93, Zeile 10 von unten ist zu setzen statt „gleich“: ähnlich

Seite 95, erste Zeile von oben ist hinter „Reihen U“ einzufügen: ⁹⁾

Seite 95 muß der erste Satz des dritten Absatzes lauten:

In Fig. 7 sind in der obersten und dritten Reihe von oben rechteckige Formant-

Seite 95, letzte Zeile der Fußnote muß lauten: wird „Wolf“ vermieden.

Seite 95, letzte Zeile vor dem Bild muß es heißen statt „Sägezahlschwingung“:
Sägezahnschwingung

Zum Beitrag: „Reaktionen auf akustische Reize“ von Fritz Enkel

Seite 58, Ende des ersten Absatzes statt m/sec zu setzen: ms

Seite 62, Zeile 11 von oben muß es heißen statt m/sec: ms

WESTMINSTER

NEW YORK

Die erstaunlichste Leistung als Klangaufnahme

vorher nicht erreichte High-Fidelity mittels des neuen Westminster
Kompensationsmikrophons und einer revolutionären Neugestaltung
der Aufnahmetechnik

Laboratorium Serien

Wir empfehlen:

GUSTAV MAHLER	Sinfonien Nr. V/VII/X
ARTHUR HONEGGER	Pacific, Rugby, Mouvement symph., Prelude „La Tempête“
IGOR STRAWINSKY	Petrouschka, Feuervogel
SERGE PROKOFIEW	Skythische Suite, Leutnant Kije

In neuer Auflage:

JOH. SEBASTIAN BACH Matthäuspassion

WESTMINSTER

NEW YORK

TELEFUNKEN

Studiotechnik

**Jahrzehntelange Erfahrung in
Planung, Anordnung und Gestaltung**

Wir liefern:

Einzelstudiogeräte für Rundfunk, Fernsehen, Tonfilm und Schallplattenaufnahme. Komplette Studioanlagen, einschließlich der Signal-, Kommando- und Abhöreinrichtungen.



Auch das Akustische Experimentalstudio GRAVESANO ist mit TELEFUNKEN-GERÄTEN ausgestattet

TELEFUNKEN G.M.B.H. · Fachgebiet Elektroakustik

Probenummer