

DIE DÄMPFUNG DES MODERNEN FLÜGELS

UND IHR EINFLUSS
AUF SEIN OBJEKTIVES KLANGBILD UND
SEINEN SUBJEKTIVEN KLANGEINDRUCK

Dissertation
vorgelegt von

EBERHARD KÜNKEL, B.MUS (status), M.MUS.

zur teilweisen Erfüllung der Prüfungsbestimmungen

zur Erlangung der Doktorwürde an der

Universität Potchefstroom

Potchefstroom, Januar 1974

DIE DÄMPFUNG DES MODERNEN FLÜGELS

UND IHR EINFLUSS
AUF SEIN OBJEKTIVES KLANGBILD UND
SEINEN SUBJEKTIVEN KLANGEINDRUCK.

Dissertation,
vorgelegt von

EBERHARD KÜNKEL, B.MUS (status), M.MUS.

zur teilweisen Erfüllung der Prüfungsbestimmungen
zur Erlangung der Doktorwürde an der
Universität Potchefstroom

Potchefstroom, Januar 1974

Exzerpt

(1 & 2)

Klaviertöne werden mit zwei Hilfsgeräten A und B mechanisch angeschlagen, mehr oder weniger gedämpft und über Terzsiebe mit einem Pegelschreiber analysiert. Die Pegelkurven werden zu "Pegelpartituren" zusammengestellt. Es zeigt sich, dass bei gedämpften Tönen

- I) die Intensitäten von Sieb zu Sieb unterschiedlich gesenkt werden,
- II) der Pegelabfall in manchen Sieben abschnittsweise, in anderen durchgehend steiler wird,
- III) in manchen Sieben Dämpferaufsatzreaktionen zu sehen sind,
- IV) ähnlich wie bei ungedämpften Tönen die Pegelkurven der einzelnen Siebe nicht gleichzeitig die Ruheebene erreichen. In beiden Fällen sind es dieselben Siebe, die am längsten abklingen.
- V) Modulationen in der Frequenz des Grundtones bei manchen Sieben auftreten. Diese Modulationen treten nur auf, wo der Grundton sehr tief liegt. Bei höheren Tönen fehlen sie, sehr wahrscheinlich wegen der Trägheit des Schreibgestänges am Pegelschreiber.

Wird der Ton nicht mit dem individuellen Dämpfer (Gerät A) sondern mit Pedaldämpfung (Gerät B) gedämpft, so kommt hinzu :

VI) Der Anteil der unteren Siebe wird lebhafter.

VII) Manche Siebe fallen steiler oder flacher und bei manchen entfällt die Modulation.

- (3) Im Gruppentest I werden vier Klänge Q, R, S und T zwei Gruppen von 55 und 11 Musikstudenten angeboten. Die Klänge sind durch den Anschlag derselben Taste gewonnen und unterscheiden sich nur durch einen verschiedenen Grad der Dämpfung. Es wird getestet, ob die Klänge subjektiv unterscheidbar sind und woran sie unterscheidbar sind. Die Antworten zeigen starke Streuungen innerhalb der Gruppen. Von Gruppe zu Gruppe sind die Antworten nahezu gleich. Für eine Zweidrittelmehrheit sind die Klänge identifizierbar, wenn je zwei in permutierten Folgen angeboten werden. Nur 7% der Testhörer können permutierte Folgen aller vier Klänge identifizieren. Antworten auf die Frage, woran sich die Klänge unterscheiden, werden aus zwei Untergruppen ausgezählt:

U_1 = die zwölf besten Leistungen bei allen
Testfragen

U_2 = die fehlerfreien Leistungen zu Testfragen
zu je zwei Klängen.

Die Streuung der Antworten zwischen den Gruppen U_1 und U_2 ist gering. Es werden Tonhöhe, Tonstärke, Dauer und Klangfarbe genannt. Einige hören einen nicht weiter bezeichneten fünften Unterschied. Die Streuung zwischen Mitgliedern der Gruppen U_1 und U_2 über die Wahl der Parameter ist gross.

- (4) Im Gruppentest II werden die Klänge Q, R, S und T dreizehn Lehrern auf drei verschiedenen Instrumenten in drei verschiedenen Räumen zum Vergleich angeboten. Die subjektiven Eindrücke der Getesteten werden geordnet und mit den Befunden aus (1 & 2) und (3) verglichen. Es zeigt sich, dass die subjektiven Eindrücke mit den Ergebnissen der objektiven Messungen im Zusammenhang stehen. Befunde aus (2) werden bestätigt.
- (5) Als Ergebnis der Arbeit zeigt sich eine vierfache Wirkung der Dämpfung. Beeinflusst werden: die Dynamik, die Zeitgestalt, die Gestalt des Spektrums und der subjektive Obertonspiegel eines Klanges. Die vierfache Wirkung wird nicht von allen Beobachtern wahrgenommen. Von denen, die sie wahrnehmen, können übereinstimmende aber nicht einheitliche Eindrücke aufgezeichnet werden.

Inhalt

1.00	Einleitung.	1
1.11	Die Dämpfermechanik beim Flügel	2
1.12	Die Dämpfermechanik beim Klavier.	4
1.2	Die Lage der Dämpfer.	7
1.3	Die Länge der Dämpfer	10
1.4	Die Formen der Dämpfer.	10
1.5	Das rechte Pedal.	11
1.6	Die Funktion des Dämpfers ist in Grenzen experimentel darstellbar.	11
2.00	Die Geräte	12
2.10	Das Gerät A.	13
2.11	Das Gerät B.	15
2.12	Geräte zur Aufnahme, Speicherung und Zerlegung	16
2.130	Schallwandler nach ihrer akustischen Wirkungsweise.	16
2.131	Schallwandler nach ihrer elektrischen Wirkungsweise.	17
2.132	Das Kondensatormikrophon	17
2.133	Die Frequenzkurve.	19
2.134	Unebenheiten beim Schalleinfall von vorne. . .	20
2.135	Gerichteter und diffuser Schalleinfall	20
2.20	Schallspeicher	21
2.21	Das Tonbandgerät	22
2.22	Bandgeschwindigkeiten und Selbstentmagneti- sierung.	22
2.23	Weitere Fehlerquellen.	24
2.231	Die Spaltbreite.	24

2.232	Der Kopiereffekt.	25
2.233	Nichtlineare Verzerrungen	26
2.234	Der Klirrfaktor	27
2.235	Grenzwerte für den Klirrfaktor	28
2.236	Die Dynamik	29
2.30	Schallanalysatoren.	30
2.31	Analogien	33
2.32	Elektrische Siebe	35
2.33	Der Pegelschreiber.	37
2.40	Die Herstellung objektiver Klangbilder.	40
2.41	Die Aufnahmen	40
2.42	Die Analysen.	42
2.50	Die Klangbilder	44
	Abbildung 10	
2.51	Abbildung 11.	47
2.511	Vergleich von Abb. 10 und 11, Abbildung 12. . . .	49
2.512	Abbildung 13.	51
2.513	Abbildung 14 und 15	53
2.514	Abbildung 16, Dämpferaufsatzreaktionen.	53
2.515	Abbildung 18 verglichen mit 14.	59
2.516	Die Abbildungen 19 bis 21	60
2.52	Ähnliche Untersuchungen mit einem höheren Ton .	65
2.521	Abbildung 22 verglichen mit Abbildung 10. . . .	65
2.522	Die Abbildungen 23 bis 25	66
2.53	Ähnliche Untersuchungen mit einem noch höheren Ton	67
2.54	Der Befund.	72

3.00	Der Einfluss der Dämpfung auf den Klangeindruck.	80
	Gruppentest I	
3.01	Das Testband	80
3.02	Die Testformulare.	82
3.03	Die Testgruppen.	84
3.04	Die Sitzordnung.	86
3.05	Die Wiedergabe	89
3.06	Fehlerquellen.	90
3.10	Die Auswertung der Antworten	91
3.11	Die Auswertung der I - Antworten	94
3.12	Die Auswertung der E - Antworten	95
3.20	Streuungen der E - Antworten	98
3.30	Gruppentest II	101
3.311	Die Töne	102
3.312	Die Räume.	103
3.313	Die Instrumente.	104
3.314	Die Hörer.	105
3.32	Der Test	107
3.33	Die Beobachtungen.	108
3.34	Die Wertung der Befunde.	113
3.351	Intensität, Lautstärke, Lautheit	113
3.352	Die Verdeckung	118
3.353	Räumliches Hören, Nachhall, Deutlichkeit	120
3.354	Verständlichkeit und Deutlichkeit.	121
3.355	Räumliches Musikhören.	126
3.356	Die Lautstärke Abhängig vom Zusammenhang	126
3.36	Tonhöhe, Klangfarbe.	127

3.37	Die Modulationen der Pegelkurven.	129
3.38	Der fehlende Grunton trotz alledem hörbar .	132
3.39	Unsaubere Obertöne.	134
3.40	Tonhöhenunterschiede durch das Pedal. . . .	134
3.50	Pegelkurven höherer Töne sind nicht moduliert	136
4.00	Die Einordnung des Befundes	136
4.10	Zitate zur Dämpfung allgemein	137
4.11	Über den Pedalgebrauch.	138
4.12	Über das halbe Pedal.	140
4.13	Über den einzelnen Dämpfer.	142
4.14	Über einzelne Aspekte der Dämpfung. . . .	144
4.15	Zitate im Widerspruch zum Befund der vorliegenden Arbeit	146
4.16	Die Folgen.	151
4.20	Subjektive Beobachtungen.	152
4.21	Prominente Obertöne, Mixturklänge	152
4.22	Der Störabstand beim Klavierklang, Nähe und Ferne	154
4.23	Zwei Bewertungen für das Tonende.	156
5.00	Zusammenfassung	157
	Bedankungen	159
	Quellen	161

1.00

Einleitung

In der Literatur über das Klavier und das Klavierspiel offenbart sich eine Lücke. Man hat nicht über die Dämpfung geschrieben. Das wäre keine Unterlassung, wenn die Dämpfung unbedeutend für die künstlerische Verwendung des Instruments wäre. Das ist aber nicht der Fall. Es scheint sogar, als sei die Dämpfung jener Teil des Instruments, dessen Einsatz dem Spielenden ermöglicht, im Klang eine persönliche Note zu entwickeln.

Die vorliegende Arbeit soll hier ansetzen. Es sollen zunächst experimentelle Befunde zur Wirkungsweise des Dämpfers dargestellt werden. Es soll dann untersucht werden, wieweit objektiv festgestellte Wirkungen das subjektive Klangbild beeinflussen. Schliesslich sollen die Ergebnisse der Untersuchung mit Beobachtungen und Ansichten aus früheren Veröffentlichungen verglichen werden. Die Arbeit endet mit einigen subjektiven Beobachtungen, die als Anregung für die künstlerische Auswertung der Ergebnisse gedacht sind.

1.11 Die Dämpfermechanik.

Die Abbildung 1 zeigt die Dämpfermechanik beim Flügel. Die Mechanik ist dreiteilig. Von rechts nach links gelesen besteht sie aus der Taste, dem Dämpferarm und dem Dämpfer.

Die Taste ist ein zweiarmiger Hebel mit dem Unterstützungspunkt in der Mitte, dem sogenannten Waagebalken. Der rechte Hebelarm ist mit dem Tastenbelag bedeckt. Er bildet den für den Spieler sichtbaren Teil der Taste. Der linke Hebelarm trägt am äussersten Ende ein kleines Filzkissen, den sogenannten Dämpferabhebefilz. Unmittelbar darüber zeigt sich der Dämpferlöffel, der metallene Fortsatz des Dämpferarmes. Letzterer ist ein mit Blei beschwerter einarmiger Hebel. Des- sen Unterstützungspunkt ist ein in Filz gelagerter Metallstift, ein Gelenk also, in der Fachsprache mit Dämpferkapsel bezeichnet. Durch ein ähnliches Gelenk ist der Dämpferklotz mit dem Dämpferarm verbunden. Der Dämpferklotz ist der leicht keulen- förmige Teil oberhalb des Dämpferarms, an dem der aufwärts- führende Dämpferdraht mittels der winzigen Dämpferklotz- schraube befestigt ist. Der Dämpferdraht geht wenige Zenti- meter unterhalb der Saite durch eine Bohrung der sogenannten Führungsleiste hindurch, führt nur wenige Millimeter an der Saite vorbei und trägt den darüber liegenden Dämpfer. Das ist der einzige, normalerweise sichtbare Teil der Dämpfung, den die Fachsprache Dämpferpüschel nennt.

Der Dämpferpüschel kann auf zweierlei Art von der Saite gehoben werden. Einmal durch Fingerdruck auf die Taste, der zur Folge hat, dass sich der Dämpferabhebefilz gegen den Dämpferlöffel stemmt. Der Dämpferarm und damit der Dämpfer- klotz mit Dämpferdraht und Dämpferpüschel hebt sich dann. Zum

The drawing shows a mechanical assembly with various components labeled with numbers 1 through 14. The assembly includes a base with rollers (1), a central frame (2), a large rectangular component (3), a vertical rod (9), a horizontal bar (10), and a top cap (11). A complex mechanism on the left side includes a lever (6), a pivot (7), a spring (8), a guide (12), and a pilot (13). A dashed line indicates a path or movement of a component (14).

Der Waagebalken	2
Der Dämpferabhebefilz	3
Der Dämpferlöffel	4
Der Dämpferarm	5
Die Dämpferkapsel	6
Der Dämpferklotz	7
Die Dämpferklotzschraube	8
Der Dämpferdraht	9
Die Führungsleiste	10
Der Dämpferpüschel	11
Die Dämpferabhebeleiste	12
Die Regulierpilote	13
Die Dämpferpralleiste	14

The drawing shows a mechanical assembly with various components labeled with numbers 1 through 14. The main body is a large, angled plate (1) supported by a base (2). A vertical rod (9) passes through the assembly, with a weight (10) at the top and a handle (11) at the bottom. A lever arm (5) is attached to the side, with a pivot point (6) and a weight (14). A small component (13) is located near the base of the lever. A large, irregularly shaped component (3) is positioned in the center, with a handle (4) and a weight (7) attached. A small component (8) is located near the handle (4). A large, irregularly shaped component (12) is positioned at the bottom left, with a handle (12) and a weight (13) attached. A small component (14) is located near the handle (12). A large, irregularly shaped component (11) is positioned at the top, with a handle (11) and a weight (10) attached. A small component (10) is located near the handle (10). A large, irregularly shaped component (9) is positioned in the center, with a handle (9) and a weight (8) attached. A small component (8) is located near the handle (8). A large, irregularly shaped component (7) is positioned at the bottom, with a handle (7) and a weight (6) attached. A small component (6) is located near the handle (6). A large, irregularly shaped component (5) is positioned at the top, with a handle (5) and a weight (4) attached. A small component (4) is located near the handle (4). A large, irregularly shaped component (3) is positioned in the center, with a handle (3) and a weight (2) attached. A small component (2) is located near the handle (2). A large, irregularly shaped component (1) is positioned at the bottom, with a handle (1) and a weight (1) attached. A small component (1) is located near the handle (1).

Der Waagebalken	2
Der Dämpferabhebefilz	3
Der Dämpferlöffel	4
Der Dämpferarm	5
Die Dämpferkapsel	6
Der Dämpferklotz	7
Die Dämpferklotzschraube	8
Der Dämpferdraht	9
Die Führungsleiste	10
Der Dämpferpüschel	11
Die Dämpferabhebeleiste	12
Die Regulierpilote	13
Die Dämpferpralleiste	14

The drawing shows a mechanical assembly with various components labeled with numbers 1 through 14. A large, irregularly shaped component is shown in a dashed outline, indicating its position relative to the other parts. The assembly includes a horizontal beam (1) supported by a base (2), a vertical rod (9) with a handle (10) and a weight (11), and a complex mechanism (12) with a lever (13) and a spring (14). The legend on the right lists the parts in German:

Der Waagebalken	2
Der Dämpferabhebefilz	3
Der Dämpferlöffel	4
Der Dämpferarm	5
Die Dämpferkapsel	6
Der Dämpferklotz	7
Die Dämpferklotzschraube	8
Der Dämpferdraht	9
Die Führungsleiste	10
Der Dämpferpüschel	11
Die Dämpferabhebeleiste	12
Die Regulierpilote	13
Die Dämpferpralleiste	14

ändern kann durch Fussdruck auf das Dämpferpedal die Dämpferabhebeleiste nach oben gestemmt werden. Die Dämpferabhebeleiste ist hier im Querschnitt gezeichnet und erscheint als schiefwinkliges Viereck unterhalb des Dämpferarms.. Auf die Dämpferabhebeleiste ist ein Filzkissen, das Abhebeleistenfilztuch, aufgeleimt. Dieses Filztuch wird nun gegen die Regulierpilote an der Unterseite des Dämpferarms gepresst. Wieder hebt sich der Dämpferarm, der Dämpferklotz und der Dämpferpüschel. Die Regulierpilote ist auf der Zeichnung deutlich als eine nach unten aus dem Dämpferarm herausragende Schraube sichtbar. Die Dämpferpralleiste, im Querschnitt gezeichnet als rechtwinkliges Viereck oberhalb des Dämpferarms sichtbar, ist an der Unterseite mit Filz verkleidet. Sie verhindert, dass der Dämpfer bei heftigem Spiel zu weit aus der Ruhestellung geschleudert wird.

1.12 Die Abbildung zwei zeigt die Dämpfermechanik beim Klavier. Auch diese Zeichnung ist von rechts nach links zu lesen. Die Mechanik ist dreiteilig. Sie besteht aus der Taste, dem Hebeglied und dem Dämpferarm.

Die Taste ist wiederum ein zweiarmiger Hebel. Der Unterstützungspunkt, der sogenannte Waagebalken, liegt aber nicht in der Mitte sondern weiter links. Ganz links ist eine Pilote in die Taste eingeschraubt. Auf der Pilote ruht das Hebegliedsattelpolster, das seinerseits mit dem Hebeglied verleimt ist. Dieses ist ein zweiarmiger Hebel. Dessen Unterstützungspunkt ist ein in Filz gelagerter Metallstift, ein Gelenk also, in der Fachsprache Hebegliedkapsel genannt. Die Hebegliedkapsel teilt das Hebeglied nicht in der Mitte sondern

ziehlich weit links. Der Dämpferlöffel ist beim Klavier nicht ein Fortsatz des Dämpferarms wie beim Flügel, sondern ein Fortsatz des Hebeglieds. Er ist deutlich links von der Hebegliedkapsel zu sehen.

Der Dämpferarm ist beim Klavier ein zweiarmiger Hebel, dessen Unterstützungspunkt, die Dämpferkapsel, in der Mitte liegt. Am unteren Ende, gegenüber dem Dämpferlöffel, ist der Dämpferarm mit Filztuch ausgekleidet. Etwas weiter oben sieht man die Dämpferstellschraube. Am oberen Ende des Dämpferarms ist der Dämpferdraht eingelassen, an dem mit der winzigen Dämpferpuppenschraube die Dämpferpuppe befestigt ist. Der Dämpferpüschel ist mit der Dämpferpuppe verleimt. Die Dämpferfeder drückt den oberen Dämpferarm und damit den Dämpferpüschel gegen die Saite.

Wie beim Flügel kann der Dämpfer auf zweierlei Art von der Saite abgehoben werden. Einmal durch Fingerdruck auf die Taste. Die Pilote stemmt dann das Hebeglied nach oben, der Dämpferlöffel presst darauf den unteren Dämpferarm nach links und der obere Dämpferarm weicht nach rechts aus, wobei er den Dämpferpüschel von der Saite nimmt. Zum andern durch Fussdruck auf das Pedal. Das Pedalgestänge stemmt dann die Abhebestange nach oben. Diese ihrerseits drückt alle unteren Dämpferarme nach links und hebt damit alle Dämpferpüschel von den Saiten ab. Die Dämpferpralleiste ist beim Klavier gegenüber den Dämpferdrähten schräg unterhalb der Dämpferpuppen an den Mechanikbacken eingeschraubt.

Die Dämpfermechanik beim Klavier

The diagram illustrates the internal mechanism of a piano damper. On the left, a detailed view shows the damper arm (17) pivoted at the damper puppetscrew (12) and damper flange (11). The damper flange (13) is attached to the damper wire (10). The damper flange (14) is connected to the damper flange (15) via the damper flange (16). The damper flange (15) is connected to the damper flange (14) via the damper flange (13). The damper flange (13) is connected to the damper flange (12) via the damper flange (11). The damper flange (11) is connected to the damper flange (10) via the damper flange (9). The damper flange (9) is connected to the damper flange (8) via the damper flange (7). The damper flange (7) is connected to the damper flange (6) via the damper flange (5). The damper flange (5) is connected to the damper flange (4) via the damper flange (3). The damper flange (3) is connected to the damper flange (2) via the damper flange (1). The damper flange (1) is connected to the damper flange (0) via the damper flange (17).

Abbildung 2

Die Dämpfermechanik beim Klavier

Die Taste	1
Der Waagebalken	2
Die Pilote	3
Das Hebegliedsattelpolster	4
Das Hebeglied	5
Die Hebegliedkapsel	6
Der Dämpferlöffel	7
Die Dämpferkapsel	8
Die Dämpferstellschraube	9
Der Dämpferdraht	10
Die Dämpferpuppe	11
Die Dämpferpuppenschraube	12
Der Dämpferpüschel	13
Die Dämpferfeder	14
Die Dämpferpralleiste	15
Die Abhebestange	16
Der Dämpferarm	17

1.2 Die Lage der Dämpfer.

Die Abbildung 3 zeigt die Lage der Dämpfer. Diese hat man wahrscheinlich durch einen Kompromiss der klanglichen und technischen Ansprüche des Instruments rein empirisch gefunden. Denn aus klanglichen Gründen baut man den Dämpfer so nahe wie möglich an die Anschlagstelle des Hammers. Aus technischen Gründen baut man wiederum die Anschlagstellen in einer Geraden. Das hat leider zur Folge, dass die Anschlagstelle und damit auch der Dämpfer nicht immer genau ein Achtel der Saite trifft, sehr zum Verdruss des Egaliseurs.

"Wenn man eine Saite, welche mit einem Resonanzboden in Verbindung steht, durch Anschlagen oder Reisen, in verschiedenen Entfernungen von ihrer Auflage, in Vibration setzt, so bemerkt man, bei nur wenig Aufmerksamkeit, dass es nur einen Anschlagspunkt gibt, an welchen die Saite den Klang am vollkommensten angibt.

Hat die Saite ihre vollkommene Spannung erreicht so steht dieser Punkt in einem gewissen Verhältniss zur Saitenlänge. Die Erfahrung belehrt uns hierüber am besten und bestimmt uns das Maximum dieser Grösse als $\frac{1}{8}$ und das Minimum als $\frac{1}{9}$ der ganzen Saitenlänge. Bei $\frac{1}{9}$ ist die Klangfarbe etwas härter.... Bei $\frac{1}{8}$ erhält man das Angenehme der Klangfarbe.....

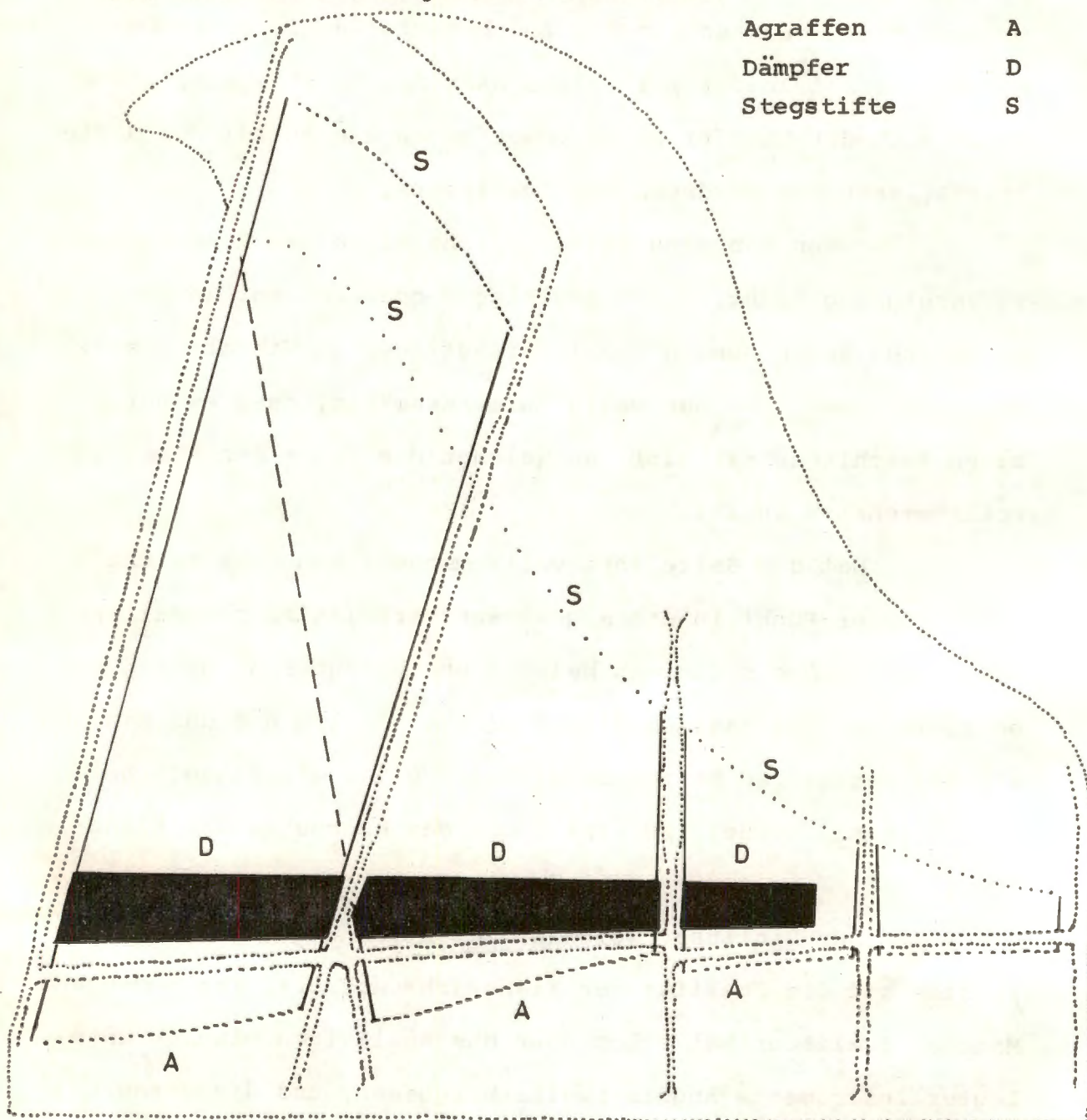
Der Einfluss, welchen die Entfernung des Anschlagpunktes auf die Egalität der Klangfarbe äussert, ist bedeutend. Mancher Egaliseur hat schon über das Egalisiren planlos angelegter Instrumente Angstschweiss vergossen, und die Ursache

Abbildung 3

Die Lage der Dämpfer im Verhältnis zur Saitenlänge beim Flügel.

Die Saite schwingt zwischen der Agraffe und dem Stegstift.

Der Mittelpunkt des Dämpfers unterteilt diesen Abstand nicht bei allen Saiten im gleichen Verhältnis.



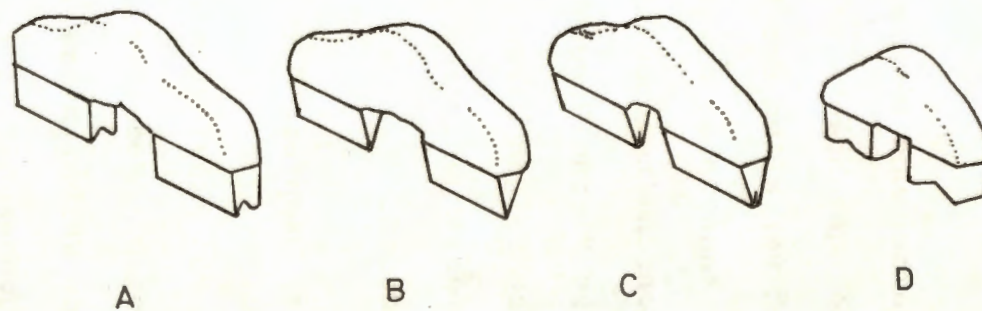


Abbildung 4
Die vier Dämpfertypen des Flügels

des Nichtgelingens öfters dem Gerber zur Last gelegt, ohne die wirkliche Ursache davon zu ahnden. Ich erinnere mich, dass ich selbst, als Gehilfe, Instrumente egalisiert habe (oder besser gesagt, habe egalisieren sollen), wo die Anschlagslängen zwischen $1/12$ und $1/7$ variierten. Dies geschah in Fabriken von bedeutendem Rufe."¹⁾

Wären die Hämmer und Dämpfer punktförmig, so könnten diese Ausführungen uneingeschränkt gelten. Im Verhältnis zur Saitenlänge hat jedoch vor allem der Dämpfer eine beträchtliche Ausdehnung. Man kann daher nicht berechnen, welchen Einfluss er auf die Saitenschwingungen haben könnte. Sicherlich wirkt er nicht so, dass kleine Ungenauigkeiten seiner Lage sofort grobe klangliche Folgen haben. Jedenfalls kann nur auf dem Umweg über Experimente genaueres über seinen Einfluss auf den Klang ermittelt werden.

1.3 Die Länge der Dämpfer.

Die meisten Aufnahmen von Klaviertönen für die vorliegende Untersuchung wurden auf D - Modellen der Firma Steinway & Sons gemacht. Folgende Verhältnisse von Saitenlängen zu Dämpferlängen wurden gemessen:

A_{II}	($27\frac{1}{2}$ Hz)	21 : 1
a	(220 Hz)	11 : 1
a''	(880 Hz)	4,2 : 1

Diese Werte sind offenbar empirisch gefunden worden.

1.4 Die Formen der Dämpfer.

Abbildung 4 zeigt, dass die Form des hölzernen Dämpferrückens von der tiefsten bis zur höchsten Saite gleich bleibt. Die

Filzpolster an der Unterseite des Dämpfers gibt es dagegen in vier verschiedenen Typen. Typ A (zwölf Stück) liegt auf den untersten Saiten. Typ B (dreizehn Stück) deckt den nächsthöreren zweichörigen Bezug. Typ C (neun Stück) ist keilförmig wie Typ B, liegt aber auf dreichörigem Bezug und zeigt die doppelte Keilform. Typ D (fünfunddreizig Stück) liegt ebenfalls auf dreichörigem Bezug, ist aber nicht keilförmig. Jeder Dämpfer dieses Typs hat zwei Filzpolster. Diese haben je eine Steppnaht quer zur Saitenrichtung in der Mitte. Der Dämpfer berührt bei leichtem Aufsatz die Saite also in vier Zonen, die sich mit zunehmenden Druck verbreitern.

1.5 Das rechte Pedal.

Das Dämpferpedal überträgt mit seinem Gestänge die Fussbewegung des Spielers auf die Abhebeleiste beim Flügel oder die Abhebestange beim Klavier. Die Übertragung geschieht im Verhältnis von ungefähr 1 : 1. Dabei werden alle Dämpfer gleichzeitig bewegt.

1.6 Zusammenfassung.

Die Mechanik der Dämpfung ist also denkbar einfach. Es kann dabei keine Geheimnisse geben. Geheimnisvoll ist allenfalls die Technik, deren sich der Spieler beim Gebrauch der Dämpfung bedient. Es ist aber unwahrscheinlich, dass man spieltechnische Einzelheiten experimentell aufdecken kann. Daher beschränkt sich die folgende Arbeit darauf, experimentell darstellbare Wirkungen des Dämpfers unabhängig vom Klavierspiel zu untersuchen. Es versteht sich von selbst, dass Befunde unter

dermassen rigorosen Einengungen der pianistischen Wirklichkeit nicht ohne weiteres für das künstlerische Klavierspiel gelten. Sie können aber Einblicke in die Zusammenhänge vermitteln.

2.00 Die Geräte.

Experimentell darstellbar wird die Wirkung des Dämpfers unter drei Voraussetzungen:

1.) Klaviertasten müssen wiederholbar mechanisch angeschlagen werden können.

2.) Die Dämpfung muss wiederholbar mechanisch bedient werden können.

3.) Derartig erzeugte Klänge müssen wiederholbar aufgenommen, gespeichert und zerlegt werden können.

Da alle drei Bedingungen unmittelbare menschliche Beteiligung ausschliessen, zeigen sich die Befunde der Experimente zunächst in objektiven Klangbildern. Selbstverständlich ist das nicht die Endstufe der Arbeit, denn ohne gültigen Beziehungen zum menschlichen Klangeindruck besagen Klangbilder wenig. Trotz dieser verhältnismässig untergeordneten Rolle sind sie nur unter bestimmten Umständen erhältlich. Es soll zunächst gezeigt werden, wie sie in der für diese Arbeit gewählten Form aufgenommen werden können.

Dazu sind verschiedene Geräte erforderlich.

Die ersten beiden Voraussetzungen können durch zwei Hilfsgeräte erfüllt werden. Das Gerät A sorgt für den Anschlag der Taste und für die Bedienung des dazugehörigen Dämpfers. Das Gerät B sorgt für die Bedienung des Pedals.

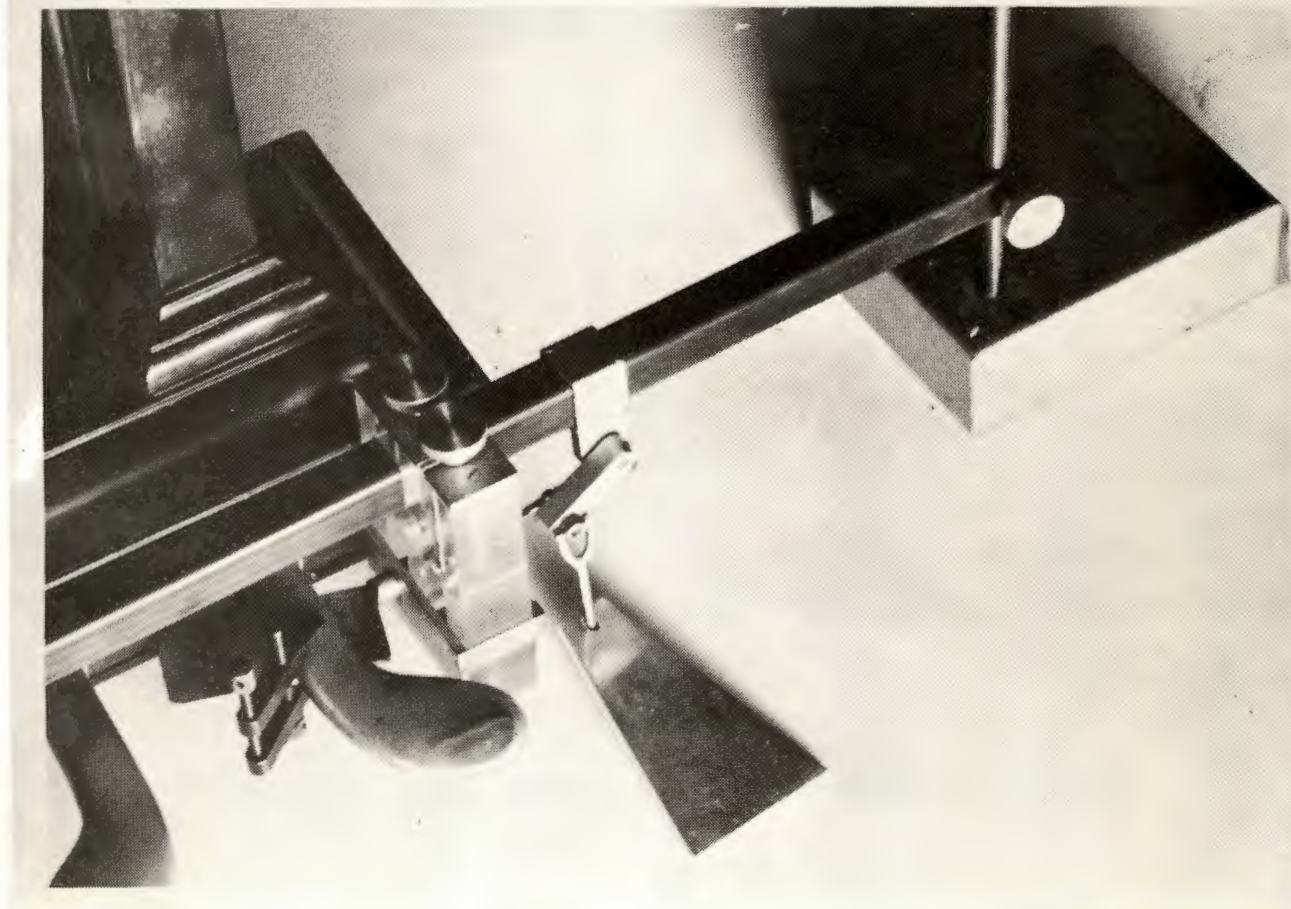
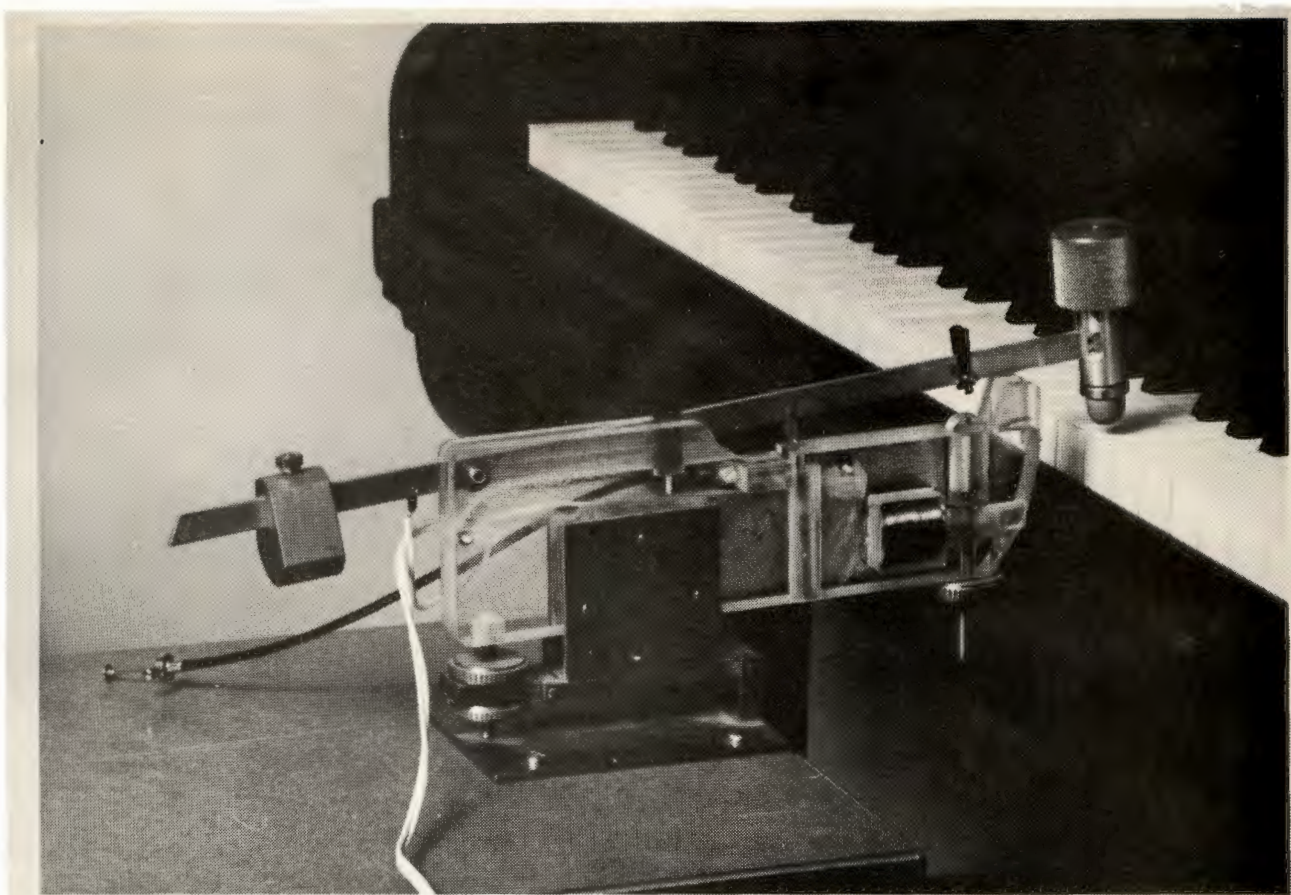


FOTO: GERÄT A (oben), GERÄT B (unten)

2.10 Das Gerät A.

Das Gerät hat zwei Funktionen, die schon rein äusserlich unterscheidbar sind (siehe Foto.). Die Aussenorgane gehören zur ersten, die Innenorgane zur zweiten Funktion.

1. Funktion : Anschlag der Taste.

Zur ersten Funktion gehört der Hammerkopf rechts über der Tastatur. Unmittelbar über der Taste ist eine Gummikappe, darüber ein Schraubring, darüber der Hammerkopfträger und darüber das abschraubbare Hammerkopfgewicht. Der Hammerkopf ist am Hammerkopfträger mit dem Hammerstiel vernietet. Dieser ist eine Aluminiumschiene, auf der sich ein Stellgewicht mit Stellschraube verschieben lässt. Das Stellgewicht wiegt den linken, kürzeren Hebelarm gegen den rechten, längeren Hebelarm mit Hammerkopf aber ohne Hammerkopfgewicht auf. Der Unterstützungspunkt des Hammerstieles, eine metallene Achse, ist rechts vom Stellgewicht sichtbar. Weniger gut sichtbar ist weiter rechts eine zweite, metallene Achse im Hammerstil. Diese Achse ist sehr dünn und liegt etwa in der Mitte zwischen dem Unterstützungspunkt des Hammerstieles und dem Hammerkopf. Sie dient als Drehpunkt eines Aluminiumärmchens, das in eine Bohrung im Kunststoffleib des Gerätes hineinragt. Das Ärmchen hat - auf dem Foto unsichtbar - sieben Zacken. Je nach Stellung rastet ein Schneller in eine dieser Zacken ein. Mit einem auf dem Foto sichtbaren Auslöserdraht kann der Schneller gezogen werden. Dann schlägt der Hammer zu. Das Ärmchen unterstützt also den Hammerstiel in Bereitschaftsstellung, und zwar in einer von

sieben wählbaren Fallhöhen. Auf dem Foto ist eine Bereitschaftsstellung aufgenommen. Der Schneller ist in der dritten Zacke des Ärmchens eingerastet. In diese Stellung wird das Gerät durch Handbedienung gebracht. Beim Anschlag ist dann aber lediglich erforderlich, dass der Auslöserdraht bedient wird.

2. Funktion : Blockade der Taste.

Das Gerät hält die Taste auf dem Rückweg vom Tastenbett in die Ruhelage an einer wählbaren Stelle fest. Das Hauptorgan für diese Funktion ist eine deutlich sichtbare Spule rechts unten im Kunststoffleib. Diese Spule ist ein Elektromagnet, der unter Strom als Auslöser wirkt. Er zieht einen auf dem Foto unsichtbaren Schneller ab. Der Schneller rastet ein, wenn ein vor ihm gelagerter Bolzen tief genug in den Kunststoffleib hinabgedrückt wird. Von dem Bolzen sieht man auf dem Foto nur den rundlichen Kopf aus dem Kunststoffleib herausragen. Der Bolzen strebt unter Federdruck nach oben. Er ist aber mit dem unten aus dem Gerät ragenden Stift fest verbunden, auf den eine Stellmutter aufgeschraubt ist. Der Bolzen kann daher jeweils soweit nach oben fahren, wie die Einstellung der Stellmutter zulässt. Vor dem Anschlag muss der Bolzen nach unten gedrückt werden, bis er völlig im Kunststoffleib verschwindet. In dieser Stellung rastet der Schneller ein und hält ihn fest. Beim Anschlag fällt der Hammerstiel so weit herunter, dass seine Fängerzange den rundlichen Kopf des Bolzens im Kunststoffleib zu fassen kriegt. Die Zange schnappt mit Federkraft zu und verbindet damit den Hammerstiel fest mit

dem Bolzen. Inzwischen hat aber der Hammerstiel eine Kupferzunge - ganz rechts im Kunststoffleib sichtbar - berührt und damit einen Stromkreis geschlossen. Der Erfolg ist, dass die Spule den Schneller abzieht und der Bolzen in die Höhe schiesst, soweit die Stellmutter das zulässt. Bolzen, Hammerstiel und Hammer werden also auf dem Weg nach oben an einer Stelle ruckartig festgehalten. Das gilt dann auch für die angeschlagene Taste und deren Dämpfer, wie beabsichtigt.

2.11 Das Gerät B.

Dieses Gerät hat nur eine Funktion. Es soll das Dämpferpedal auf dem Rückweg in die Ruhelage an einer einstellbaren Stelle festhalten. (Siehe Foto).

An dem Dämpferpedal wird daher mit einer kleinen Zwinge ein Metallplättchen festgeschraubt. Tritt man das Pedal herunter, so fährt das Metallplättchen an der schrägen Stirnseite eines Bolzens vorbei. Der Bolzen strebt unter Federdruck nach links. Er weicht aber nach rechts aus, wenn das Metallplättchen an seiner schrägen Stirnseite herabfährt. Sobald das Metallplättchen vorbeigefahren ist, springt er wieder nach links und sperrt damit dem Metallplättchen und dem Dämpferpedal den Rückweg. Das Dämpferpedal kann jetzt erst dann in die Ruhelage zurückkehren, wenn die Sperre durch die Bedienung des trapezförmigen Hilfspedals wieder aufgehoben wird.

Das Gerät ruht auf zwei Bleiblöcken, von denen einer auf dem Foto sichtbar ist. Die Schulterstange, auf der die Hauptorgane des Gerätes aufgehängt sind, ist ihrerseits mit Stellschrauben fixierbar. Das Hauptorgan ist selbstverständ-

lich der Bolzen, der in einem Kunststoffblock gelagert ist. Auf der Scheitelfläche des Blockes sind zwei Stellschrauben zu sehen. Die hintere davon hält den Block in der einmal gewählten Stellung auf der Schulterstange fest. Mit der vorderen lässt sich die Höhe einstellen, auf der dem Dämpferpedal der Rückweg gesperrt werden soll.

2.12 Die Geräte A und B erfüllen die ersten beiden Voraussetzungen zum Experimentieren mit dem Dämpfer (siehe 2,00). Sie sind eigens zu diesem Zweck entworfen und gebaut worden. Für die dritte Voraussetzung genügen Geräte, die nicht für den besonderen, vorliegenden Fall des Klavierklanges sondern ganz allgemein für klangliche Messungen und Analysen entworfen sind. Der Klavierklang soll 1.) aufgenommen, 2.) gespeichert und 3.) analysiert werden und Geräte, denen man diese Tätigkeiten anvertrauen kann, müssen nummehr ausgewählt werden.

2.130 Schallwandler.

Schallwandler sind Geräte, mit deren Hilfe Schallwellen in Wellen anderer Energieformen überführt werden. Bei den meisten ist die andere Energieform die Elektrizität. Grundsätzlich ist die Umwandlung reversibel, obwohl nicht jedes Gerät in beiden Richtungen gleiches leisten kann. Je nachdem ein Gerät für den Gebrauch in einer der beiden Richtungen entworfen ist, spricht man bei elektrischen Schallwandlern von Lautsprechern oder Mikrofonen.

Es gibt verschiedene Mikrophontypen, denn ein Schallfeld, der Ort an dem man sich die Schallwellen zur Um-

wandlung holt, ist durch mehrere Grössen definiert. Diese sind : die Schalldruckschwankung, das Schalldruckgefälle, die Teilchenbewegung, die Schnelle und die Temperaturschwankung. Es genügt, jeweils eine dieser Grössen in elektrische Schwingungen umzuformen. Mikrophone werden deswegen als Druckempfänger, Druckgradientempfänger, Bewegungempfänger, Schnelleempfänger und thermische Empfänger gebaut.

2.131 Keine der genannten Grössen kann direkt in elektrische Schwingungen umgewandelt werden. Beim Entwurf eines Mikrophons wird deswegen ein Vermittlungsglied vorgesehen; meistens ist das ein schwingungsfähiges, mechanisches System. Eine der Schallfeldgrössen versetzt das mechanische System in erzwungene Schwingungen, die ihrerseits elektrische Schwingungen verursachen.

Je nachdem die elektrischen Schwingungen von der Elongation oder der momentanen Geschwindigkeit des mechanischen Systems abhängen spricht man von Elongations- oder Geschwindigkeitsmikrophonen.

2.132 Die Fachwelt ist sich im Sinne von F. Trendelenburg einig:

"Die für genaue Messungen und für die Aufgaben hochwertiger Schallübertragung meist benutzten Schallempfänger sind die Kondensatormikrophone, die nach ihrer akustischen Wirkungsweise als Druckempfänger, nach ihrer elektrischen - zumindest in akustisch wichtigen Frequenzbereich - als Elongationsmikrophone arbeiten.²⁾

Abbildung 5a

Frequenzkurven von Mikrofonen.

Fernsprechmikrophon üblicher
Bauart

I

Fernsprechmikrophon besonderer
Bauart

II



Beim Kondensatormikrophon hat man als Vermittlungsglied zwischen akustischer Eingangsenergie und elektrischer Ausgangsenergie eine hochgespannte und leitfähige Membran eingebaut. Diese Membran funktioniert durch eine entsprechende elektrische Schaltung als Elektrode eines Kondensators. Die dazugehörige Gegenelektrode befindet sich in geringem Abstand dahinter. Dieser Abstand wird in winzigen Grössen verändert, wenn die Schallwellen auf die Membran auftreffen. Das genügt aber bereits zur Veränderung der Kapazität des Kondensators. Man schaltet den Kondensator nun so in einen hochfrequenten Schwingkreis, dass die Kapazitätsveränderungen zu Amplitudenmodulationen des hochfrequenten Stromes führen. Durch Gleichrichtung erhält man daraus die den Schallschwankungen entsprechende Niederfrequenzspannung.

2.133 Eine besondere Bedingung bei Mikrofonen für Messzwecke liegt darin, dass das elektrische Abbild der Schallwellen im akustisch wichtigen Frequenzbereich frei von "Übersetzungsfehlern" sein muss. Man fordert also eine glatte Frequenzkurve. Die Frequenzkurve beim Kondensatormikrophon ist tatsächlich ziemlich glatt, es werden also nicht etwa einzelne Frequenzbereiche nach der Umwandlung besonders stark wiedergegeben, was natürlich das Bild verfälschen würde. Dass die Frequenzkurve nicht völlig glatt ist, zeigt Abb. 5. Beim Vergleich mit Frequenzkurven anderer Mikrophone (Abb. 5a) wird allerdings augenfällig, warum man das Kondensatormikrophon bevorzugt.

2.134 Es muss im Zusammenhang mit der Frequenzkurve noch bemerkt werden, dass deren Unebenheit zum Teil mit der Richtung zu tun hat, aus der der Schall einfällt. W. Reichardt begründet das folgendermassen: "Im oberen Frequenzbereich wirkt aber das Gitter in der Gegenelektrode zusammen mit dem dahinter liegenden Luftpolster als Helmholtzscher Resonator und hebt den Frequenzgang bis zu einem Maximum bei 10 kHz etwas an, vergl. Bild 22ib (Abb. 5 in dieser Arbeit). Man sieht diesen Anstieg im Rundfunkbetrieb als zweckmässig an, zugleich als Ausgleich für die heute mögliche Wiedergabequalität guter Lautsprecher. Er ist im übrigen auch nur bei Schallempfang von vorn wirksam, während sich im diffusen Schallfeld ein gerader Frequenzgang ergibt....."3)

2.135 Mit dem diffusen Schallfeld hat es folgende Bewandnis. Ein ideales, gerichtetes Schallfeld wäre eines, in dem sich die Schallwellen von einer punktförmigen Schallquelle kugelförmig ausbreiten und durch allmählichen Energieverlust zum Erliegen kommen, ohne je auf Gegenstände mit reflektierenden, beugenden oder brechenden Eigenschaften gestossen zu sein. Offenbar ist ein solcher Idealfall bei akustischen Experimenten allenfalls annäherungsweise darzustellen. Bei Experimenten mit einem Klavier oder Flügel ist selbst eine noch so bescheidene Annäherung an den Idealfall nicht denkbar, weil das Instrument, solange es funktionsfähig ist, aus hunderten solcher Gegenstände mit reflektierenden, beugenden oder brechenden Eigenschaften besteht. Ein völlig gerichtetes Schallfeld ist deswegen durch die Versuchsbedingungen selbst ausge-

schlossen. Das besagt jedoch nicht ohne weiteres, dass sich alle folgenden Überlegungen auf ein Schallfeld gegenteiliger Eigenschaft, nämlich völliger Diffusität, beziehen müssten.

Dafür gibt es zwei Gründe. Zunächst einmal lässt sich die Diffusität gradweise angeben. Genauer, man gibt nach einer Arbeit von Thiele⁴⁾ die Diffusität in Prozent an. Es ist daher sinnvoll, von vorwiegend gerichteten oder vorwiegend diffusen Schallfeldern zu sprechen.

Zum Zweiten spielt nicht nur die Richtung sondern auch das Verhältnis zwischen direkt und indirekt eintreffendem Schall eine Rolle. Man kann daher selbst in einem vorwiegend diffusen Schallfeld ein gerichtetes Klangbild aufnehmen, indem man das Mikrophon in unmittelbarer Nähe der Schallquelle aufstellt.

2.20 Schallspeicher.

In der Praxis der Elektroakustik haben sich drei Speicher- methoden von Klängen und Geräuschen durchgesetzt, nämlich die Schallplatte, die Klangspur beim Lichtfilm und das Tonband. Die letzte eignet sich besonders für Klanganalysen, denn das Tonband verschleisst beim Abspielen sehr viel weniger als der Lichtfilm oder die Platte. Das ist deswegen wichtig, weil bei der Analyse eines Klanges dessen Aufnahme häufig abgespielt werden muss, ohne dass Qualitätsverluste dabei eintreten dürfen.

Das Tonband hat weiterhin den Vorteil, dass es ver- hältnismässig billig kopiert werden kann. Man führt daher die Analysen mit Kopien durch, sodass die ursprüngliche Aufnahme nicht durch Verschleiss oder menschliches Versagen wie

versehentliches Löschen verdorben wird.

Schliesslich ist die Bedienung des Tonbandgerätes einfach. Bei den Versuchen für diese Arbeit wurde deswegen ausschliesslich mit Tonbandgeräten gearbeitet.

2.21 Zum Tonbandgerät gehört:

1.) Ein Tonband aus einer zerreissfesten Trägerschicht, auf der eine magnetisierbare Schicht aufgetragen ist. In dieser Schicht sind feinste Eisenoxydteilchen eingelagert.

Im Betrieb läuft das Band von der sogenannten Vorratsspule zur Aufwickelspule.

2.) Ein Löschkopf mit der Funktion, auf dem Band befindliche frühere Aufnahmen vor der Aufnahme zu löschen.

3.) Ein Sprechkopf, der das Band bei der Aufnahme magnetisiert.

4.) Ein Hörkopf, der bei der Wiedergabe die Magnetfelder auf dem Band durch Induktion in elektrische Schwingungen umsetzt.

2.22 Es gibt fünf Bandgeschwindigkeiten : 76,2 cm/s, 38,1 cm/s, 19,05 cm/s, 9,53 cm/s und 4,75 cm/s. Diese Geschwindigkeiten stellen zugleich Güteklassen der Aufzeichnung dar. Mit der höchsten Geschwindigkeit wird die beste Qualität erreicht. Hochleistungsgeräte schaffen mit dieser Geschwindigkeit Aufnahmen im Frequenzbereich zwischen 40 Hz und 40 kHz.

Im Sprechkopf wird bei der Aufnahme ein hochfrequenter Wechselstrom durch einen niederfrequenten Signalstrom moduliert. Das dabei bestehende Magnetfeld richtet die Teilchen

Abbildung 5

Der Frequenzgang eines Kondensatormikrophons

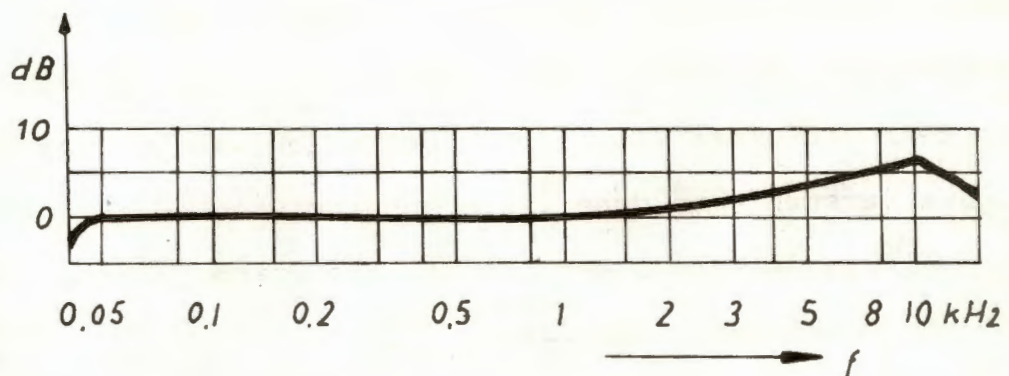
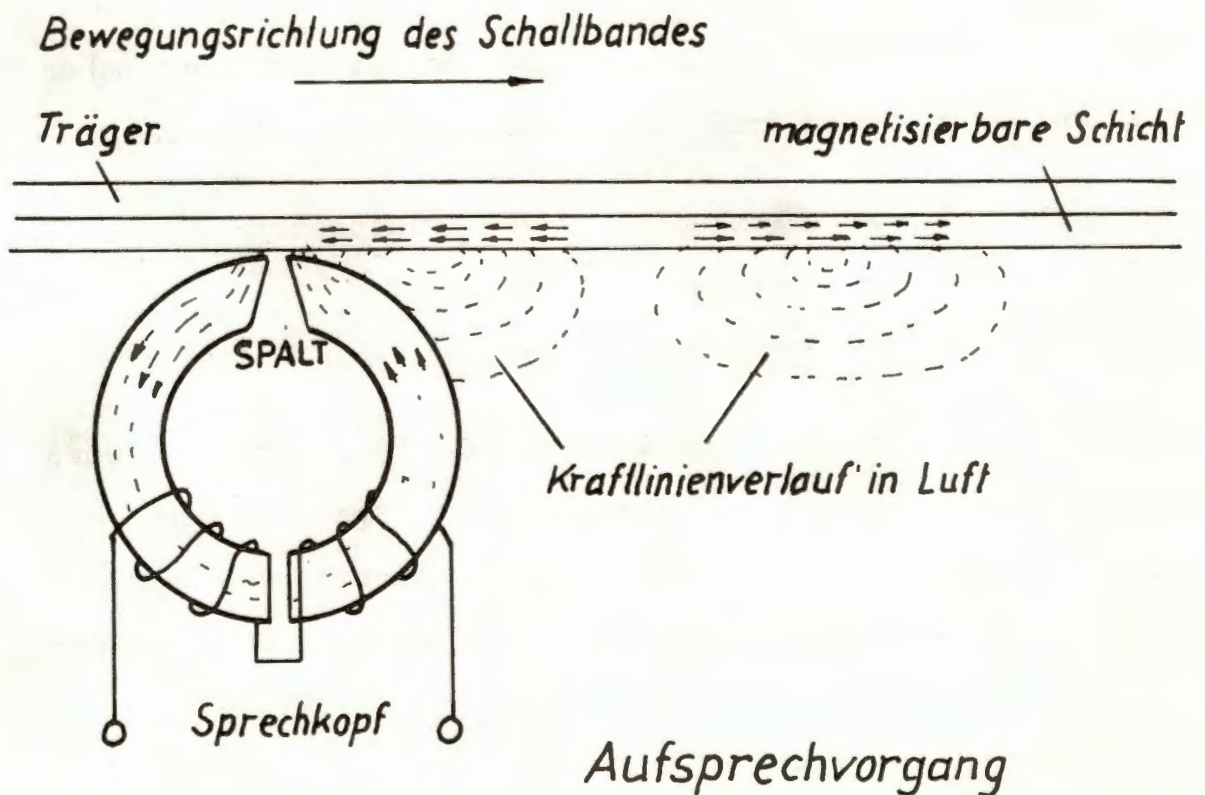


Abbildung 6

Der Spalt am Sprechkopf. Der magnetische Fluss tritt nicht nur am Spalt sondern schon bei tangentialer Berührung mit dem Band aus dem Ringmagneten.



der magnetisierbaren Schicht des Bandes so aus, dass man das Band als eine Folge von Stabmagneten auffassen kann. Die Ausrichtung geht jedoch zum Teil durch Selbstentmagnetisierung verloren, sobald das Band am Hörkopf vorbei gefahren ist. Die Selbstentmagnetisierung ist klangverzerrent, weil höhere Frequenzen sehr viel mehr als tiefere betroffen werden. Bei der Wiedergabe versucht man daher, die höheren Frequenzen im gleichen Verhältnis zu verstärken, in dem sie durch Selbstentmagnetisierung abgeschwächt wurden.

Bei der Wiedergabe wird das Band am Hörkopf vorbeigeführt. Dort induziert es einen Strom, der verstärkt und umgeformt oder analysiert werden kann.

2.23 Das Tonbandverfahren arbeitet nicht fehlerfrei. Eine Fehlerquelle, die Selbstentmagnetisierung, ist bereits genannt worden. Es gibt noch weitere vier Fehlerquellen : Die Verzerrung am Spalt, der Kopiereffekt, die nichtlineare Verzerrung und die Einengung der Dynamik.

2.231 Der Hörkopf, der Sprechkopf und der Löschkopf haben je einen Spalt. Deren Breiten sind verschieden, nämlich :

Spaltbreite am Löschkopf			200 Mikrometer		
"	"	" Hörkopf	14 ± 2	"	"
"	"	" Sprechkopf	28 ± 4	"	"

Die Verhältnisse am Spalt sind nicht sehr übersichtlich, denn der magnetische Fluss tritt nicht genau am Spalt in den Magneten ein sondern schon da, wo es zu einer tangentialen Berührung mit dem Bande kommt (Abb. 6). Deswegen muss man den

Begriff der wirksamen Spaltbreite einführen. Ferner müssen Grössen wie die Permeabilität der Luft, des Sprechkopfes und des Hörkopfes und des Bandes, sowie dessen Koerzitivkraft, die Steilheit des Feldstärkeabfalles an der Spaltkante und schliesslich die Art des Vormagnetisierungsstromes berücksichtigt werden. Es zeigt sich jedenfalls nach alledem, dass am Spalt die höheren und höchsten Frequenzen geschwächt oder gar eliminiert werden. Man kann den Verlust durch hohe Bandgeschwindigkeiten und durch Entzerrung bei der Wiedergabe in Grenzen halten.

2.232 Der Kopiereffekt bewirkt, dass man bei einer Musikwiedergabe an einer Pianostelle plötzlich eine schon erklungene Fortestelle hineinhalten hört. Musikalisch peinlicher ist noch, wenn die Fortestelle im voraus erklingt. Die Erklärung ist einfach. Bei der Aufnahme werden einzelne Stellen des Bandes bis zur Sättigung magnetisiert, andere dagegen nur spurenweise. Beim Aufspulen kommen diese Stellen übereinander zu liegen. Die stärker magnetisierten Stellen magnetisieren dann die schwächer magnetisierten Stellen.

Gegenmassnahmen sind Quermagnetisierung, zehnprozentiges Nachlöschen und Ausstattung des Bandes mit einer hochpermeablen Rückenschicht. Trotzdem heisst es beim Experimentieren mit Tonbändern wachsam bleiben. Manche Aufnahmen gehen verloren, denn bis heute ist der Kopiereffekt nicht völlig bewältigt.

2.233 Nichtlineare Verzerrungen sind an Frequenzen kenntlich, die sich unbefugt in die Aufnahme hineingeschlichen haben. Tatsächlich sind solche Verzerrungen unvermeidbar, denn nach der Unschärferelation lässt sich zeigen, dass es kein elektrisches oder mechanisches Gerät mit verzerrungsfreier Arbeit geben kann.

Nichtlineare Verzerrungen entstehen, wenn bei einem schwingungsfähigem, mechanischem System die Trägheitskräfte nicht proportional zur Beschleunigung, oder die Reibungskräfte nicht proportional zur Geschwindigkeit, oder die elastischen Kräfte nicht proportional zum Abstand von der Ruhelage sind.

Nichtlineare Systeme bringen Kombinationsschwingungen hervor, und zwar nach dem Bildungsgesetz :

$$f_k = mf_1 \pm nf_2 \quad \text{wobei } m, n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

(f_1 und f_2 sind die vorhandenen Schwingungen, zu denen eine f_k = eine Kombinationsschwingung gebildet wird. Die Faktoren m und n zeigen, dass es nicht bei einer Kombinationsschwingung bleibt.) Sobald einem nichtlinearen System zwei Grundschwingungen aufgezwungen werden, entsteht sofort eine ganze Sippschaft von sekundären Schwingungen. Nicht alle Kombinationstöne sind hörbar. Es genügen aber auch nur wenige, um das Ohr auf den Unterschied zwischen dem ursprünglichen und dem übertragenen Klang aufmerksam zu machen.

Wieweit die Kombinationstöne hörbar sind, hängt von der Stärke der Grundtöne ab, denn nach einer Untersuchung von E. Zwicker⁵⁾ verdecken zwei Grundtöne die Mehrheit ihrer Kombinationstöne selbst. (Abb. 8).

2.234 Ein Mass für den Grad der nichtlinearen Verzerrung ist der Klirrfaktor, der mathematisch geschrieben so aussieht:

$$K = \sqrt{\frac{a_2^2 + a_3^2 + \dots + a_n^2}{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + \dots + a_n^2}}$$

wenigstens bei F. Winckel⁶⁾. Man findet auch die folgenden Formen :

$$k = \sqrt{\frac{x_2^2 + x_3^2 + \dots}{x_1^2}} \quad \text{bei Trendelenburg}^{7)}$$

und

$$k = \sqrt{\frac{i_2^2 + i_3^2 + i_4^2 + \dots}{i_1^2 + i_2^2 + i_3^2 + i_4^2 + \dots}} \quad \text{bei Reichardt}^{8)}$$

Sieht man genau hin, so zeigt sich, dass die erste und dritte Notation einander gleichen. Lediglich die Buchstaben in der Formel sind verschieden gewählt. Bei Winckel steht a , wobei an die Amplitude von Oberschwingungen gedacht ist; bei Reichardt steht i , wobei an den Strom gedacht ist, der die Amplituden von Oberschwingungen im elektrischen System ausdrückt. Mathematisch allgemeiner ist deswegen die bei Trendelenburg gegebene Notation mit x . Bei Winckel ist jeder Summe ein Glied mit dem Index n angefügt. Das heisst hier nur, man bricht in der Praxis die Reihe bei einem Glied n ab.

Die bei Trendelenburg gegebene Notation bezieht den Klirrfaktor auf eine einfache Sinusschwingung, bei Winckel und Reichardt bezieht sich der Klirrfaktor auf eine Superposition von Sinusschwingungen.

Mit dem Klirrfaktor kann man objektive Aussagen über den Grad der nichtlinearen Verzerrung eines schwingungsfähigen Systems machen. Man kann sich etwa darauf einigen, 3% bei Musikübertragungen zu dulden, bei Sprachübertragungen sogar 5 - 10%. Es gibt noch andere Masse für den Grad nichtlinearer Verzerrung, denn der Klirrfaktor lässt sich manchmal nur schwer messen. Ausserdem hat sich gezeigt, dass zwei seiner Komponenten jede für sich der Untersuchung wert sind. Daher hat man den Begriff des quadratischen und des kubischen Klirrkoeffizienten geschaffen, ferner den Differenztonfaktor und den Intermodulationfaktor.

Alle diese Massstäbe sind theoretisch gleichwertig. Man kann sie sogar untereinander umrechnen. Dass man dennoch alle fünf Massstäbe anstatt eines einzigen gebraucht, liegt an praktischen Schwierigkeiten bei der Messung. Klirrfaktormessungen werden sinnlos, wenn die Oberschwingungen oberhalb des Frequenzbereiches des Übertragungssystems liegen. Differenztonfaktoren misst man dagegen bei Frequenzen unterhalb 150 Hz nicht gerne.

2.235 Höchstgrenzen zulässiger Klirrfaktoren lassen sich nicht allgemeingültig angeben. Es kommt jedesmal darauf an, welcher Art die Verzerrung ist und was übertragen wird. Jedenfalls bekämpft man nichtlineare Verzerrungen keineswegs

wahllos. Es soll so sein, dass Jazzkapellen geradezu fordern, dass man ihre Aufnahmen leicht verzerrt überträgt.¹⁰⁾

2.236 In der Akustik heisst Dynamik ein Bereich mit einem Maximum und einem Minimum von Schalldrucken. Diese werden in gewissen Einheiten ausgedrückt, nämlich

$$\text{newton pro Quadratmeter} = \text{N/m}^2$$

In früheren Veröffentlichungen findet man ausserdem noch

$$\text{dyn pro Quadratzentimeter} = \text{dyn/cm}^2$$

Für das menschliche Ohr beginnt die Dynamik bei $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$ und steigt bis zu etwa $2 \cdot 10^1 \text{ N/m}^2$ an. Dieser Bereich wird oft auch in Schallintensität angegeben und zwar zwischen den Werten 10^{-12} W/m^2 und 10^0 W/m^2 . Der Schalldruck steht zur Schallintensität in einem quadratischen Verhältnis.

Da die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres frequenzabhängig ist, gelten diese Werte nur bei 1 kHz.

Man hat für die Dynamik eine logarithmische Skala geschaffen, die Dezibelskala. Setzt man die Schallintensität 10^{-12} W/m^2 gleich 0 dB, so erhält man für 10^{-11} W/m^2 den Wert von 10 dB, 10^{-10} W/m^2 werden 20 dB usw.. 0 dB entsprechen dann $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$, 20 dB entsprechen $2 \cdot 10^{-4} \text{ N/m}^2$, 40 dB entsprechen $2 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}^2$ usw.

Nach dieser Skala hat das menschliche Ohre eine Dynamik mit dem Umfang von rund 130 dB. Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen hat das Tonbandgerät aber nur eine Dynamik mit dem Bereich von etwa 50 dB. Man nennt diesen Bereich den Nutzbereich. Er wird nach oben und nach unten von Störbereichen begrenzt. Die Störungen oberhalb des Nutzbereiches kommen zustande, weil es unmöglich ist, ein Nutzsignal über ein gewisses Mass hinaus zu verstärken und gleichzeitig den Klirrfaktor unterhalb der zulässigen Höchstgrenze zu halten.

Unterhalb des Nutzbereiches stören die Betriebsgeräusche. Diese bestehen hauptsächlich aus dem thermischen Rauschen und dem Röhrenrauschen.

Das thermische Rauschen geht darauf zurück, dass sich freie Elektronen eines elektrischen Leiters fortwährend bewegen. Sie springen dabei von einem Molekül zum anderen. Die Länge des Sprunges und die Geschwindigkeit, mit der sie springen, sind von der Temperatur des Leiters abhängig. Da die Richtung des Sprunges nach allen Seiten mit gleicher statistischer Wahrscheinlichkeit eingeschlagen wird, heben sich die Sprünge vieler

Elektronen gegenseitig auf. Denn es besteht eine gewisse, statistische Wahrscheinlichkeit, der zufolge irgendwo im Leiter ein Elektron A den entgegengesetzten Sprung eines woanders im Leiter springenden Elektrons B ausführt. Trotzdem entstehen pro Zeiteinheit gewisse Schwankungen, derart, dass sich eben doch nicht alle Sprünge genau aufheben, und das bringt einen Wechselstrom zustande. Dieser wird dem Nutzsignal überlagert, geht mit durch den Schallwandler und erscheint akustisch als ein Rauschen.

Dieses Rauschen, auch "weisses Rauschen" genannt¹¹⁾ hat ein dichtes und breites Spektrum. Das heisst, dass die Frequenzen darin denkbar dicht beieinander liegen und nicht in harmonischen Verhältnissen 1:2, 1:3, 1:4 usw. wie bei musikalischen Klängen. Das Spektrum heisst breit, weil es sich über einen sehr grossen Frequenzbereich erstreckt. Daher hat das weisse Rauschen bemerkenswerte Verdeckungseigenschaften. Es macht sich nicht nur störend bemerkbar, sondern macht es dem Ohr unmöglich, wichtige Einzelheiten des Nutzsignals überhaupt wahrzunehmen, wenn das Nutzsignal nicht weit genug über das Betriebsgeräusch verstärkt wird.

Das Röhrenrauschen ist eine ähnliche Erscheinung. Man unterscheidet dabei den Schroteffekt, den Funkeleffekt und das Stromverteilungsrauschen.

Um Klänge oder Geräusche auf Tonband festhalten zu können, muss man daher oftmals den natürlichen Klang fälschen, indem man seine Dynamik einengt. Das ist nicht immer bedauerlich sondern manchmal sogar wünschenswert. Wer lässt sich schon gerne im Wohnzimmer von einem brüllenden Lautsprecher

betäuben ? Genau das würde aber eintreten, wenn jemand eine Orchesterübertragung bei unverfälschter Dynamik in seinem Hause zuliesse. Andererseits schätzt man bei der Wiedergabe deutliche Pianissimostellen, auch wenn diese etwas "angehoben" sind. Man nimmt also eher in Kauf, dass aus dem Pianissimo ein Mezzopiano wird, als dass im echten Pianissimo der Geräuschuntergrund den Klang trübt.

Bei Experimenten ist dagegen ein willkürliches Eingehen der Dynamik des ursprünglichen Klanges unzulässig. In diesem Zusammenhang ist daher die begrenzte Dynamik des Tonbandgerätes eine potenzielle Fehlerquelle. Man bereitet das akustische Prüfmaterial möglichst so vor, dass es seinerseits einen dynamischen Bereich von etwa 50 dB nicht überschreitet.

2.30 Schallanalysatoren.

H.v. Helmholtz¹²⁾ analysierte mit Resonatoren. Er entwarf diese selbst und liess sie für seine Experimente anfertigen. Sie werden heute Helmholtzresonatoren genannt.

Es sind rundlich-tropfenförmige Hohlgebilde ähnlich den Glaskugeln, die man früher als Christbaumschmuck verwendete. Im Gegensatz zu diesen sind aber die Helmholtzresonatoren verschieden gross. Ein Satz von Resonatoren lässt sich wie Orgelpfeifen der Grösse nach ordnen. Dabei ist das grösste Stück etwa drei Dezimeter hoch, das kleinste etwa drei Zentimeter.

Helmholtz analysierte einen Klang, im dem er diesen sooft wiederholte, wie er Resonatoren zur Hand hatte. Er hielt sich jedesmal einen anderen Resonator ans Ohr und lauschte, ob

der Resonator mitklang, und wie stark er mitklang. Seine Resultate waren erstaunlich genau , denn spätere elektroakustische Analysen bestätigten seine Befunde. Trotzdem war sein Verfahren für den allgemeinen wissenschaftlichen Gebrauch ungeeignet. Es war zu subjektiv. Der entscheidende Fortschritt in der Akustik kam erst, als man mit elektrischen Geräten zu objektiven Analysen gelangen konnte. Der Schritt von der mechanischen zur elektroakustischen Analyse ist übrigens nicht so weit hergeholt. Es gibt eine Reihe von Analogien zwischen mechanischen und elektrischen Schwingungen. Wozu das führt, erhellt ein Zitat¹³⁾:

"Nun ist es eine gewiss erstaunliche Tatsache, dass heute die meisten Ingenieure auf dem Gebiet der elektrischen Schwingungsvorgänge besser Bescheid wissen als auf dem der mechanischen. Während unsere Väter sich noch bemühten, elektrische Vorgänge an Hand von mechanischen Modellen zu verstehen, ist es heute üblich geworden, sich komplizierte mechanische oder auch elektromechanische Vorgänge an Hand elektrischer Ersatzkreise "zu veranschaulichen"."

2.31 Die Analogien.

In einem mechanischem, schwingungsfähigem System gibt es drei Komponenten, zwei Energieträger und einen Energieverbraucher. Die Träger sind erstens eine Masse, zweitens eine Nachgiebigkeit. Der Verbraucher ist ein Verlustwiderstand. Auch im elektrischem, schwingungsfähigem System gibt es zwei Energieträger und einen Energieverbraucher nämlich die Kapazität und die Selbstinduktion gegenüber einem Ohm'schen Widerstand. Die

Abbildung 8

Zwei etwa gleichlaute Töne verdecken selbst die meisten ihrer Kombinationstöne. Nur die Differenztöne D_{3S} und D_2 sind hörbar.

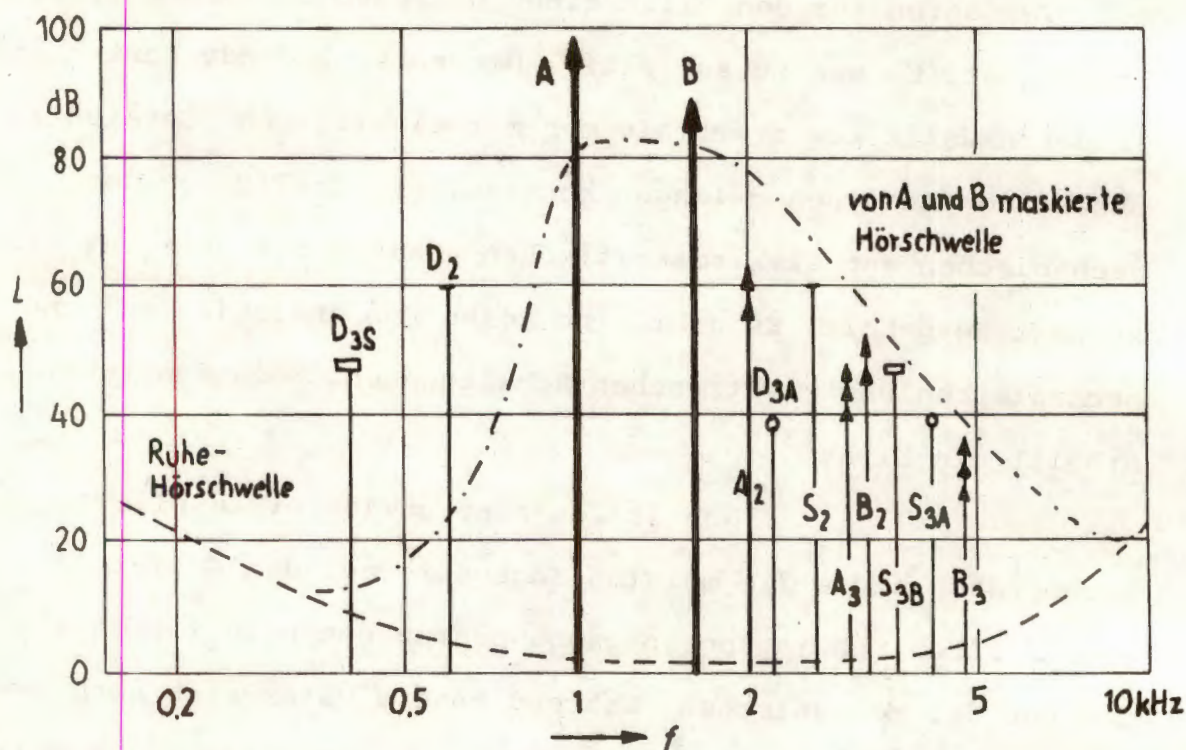
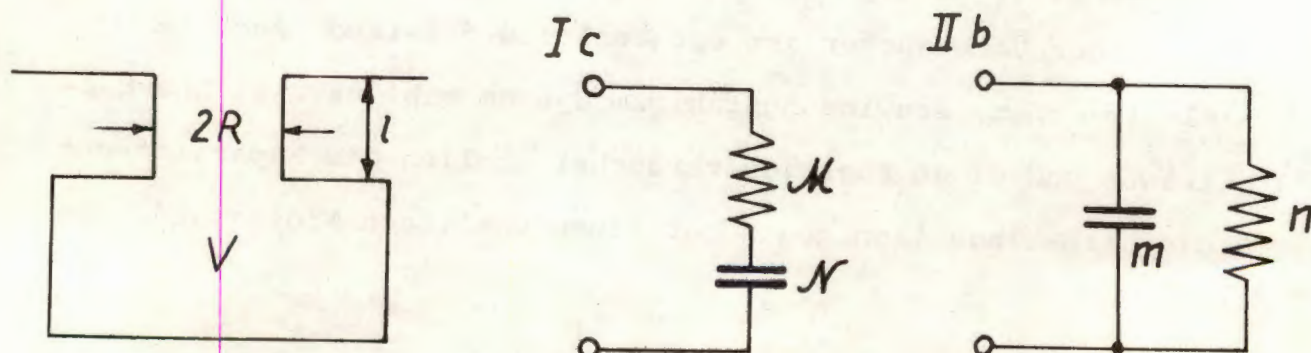


Abbildung 9

Ersatzschaltbilder zu einem Helmholtzresonator nach der Schalldruck/ Schallfluss (Ic) - und Schnelle/Kraft (IIb) -Analogie. Bei Ic steht die elektrische Induktivität für die akustische Masse M und die elektrische Kapazität für die akustische Nachgiebigkeit N . Bei IIb steht die elektrische Induktivität für die mechanische Nachgiebigkeit n und die elektrische Kapazität für die mechanische Masse m .



mechanischen oder elektrischen Komponenten werden durch Schaltsymbole wiedergegeben und auf Papier zu Schwingkreisen angeordnet. Man kann natürlich nicht die Symbole "mischen". Etwa so, dass man einen elektrischen Widerstand in einen mechanischen Schwingkreis einzeichnet. Man kann dagegen die Schaltsymbole eines Kreises verschieden anordnen, nämlich in Serienschaltung und in Paralelschaltung, wie z.B. in den beiden Ersatzschaltbildern für einen Helmholtzresonator (Abb. 9). Der Unterschied zwischen beiden liegt in der Wahl der Schallfeldgrößen, deren gegenseitiges Verhältnis man sich im Ersatzschaltbild veranschaulichen will, denn es gibt mehrere elektromechanische Analogien. Das Verhältnis Strom u zu Spannung i kann acht mal substituiert werden :

Schalldruck/Schnelle; Kraft/Schnelle; Schalldruck/Schallflu; Kraft/Schallfluss; Schnelle/Schalldruck; Schnelle/Kraft; Schallfluss/Schalldruck; Schallfluss/Kraft.¹⁴⁾

Wie ersichtlich, erscheint jedes der vier ersten Verhältnisse ein zweites mal im Kehrwert. Das ist ein Ausdruck dafür, dass man beim elektrischen Schwingkreis sowohl den Strom u als auch die Spannung i als Ursache auffassen kann. Übrigens werden nicht alle acht Analogien gleich häufig verwendet. Manche Autoren nennen überhaupt nur zwei, die Kraft/Spannung - und die Kraft/Stromanalogie.

2.32 Siebe.

Obwohl die Analogien den Gedanken nahelegen, bestehen elektrische Analysatoren nicht etwa aus Analogschaltungen zu Helmholtzresonatoren. Die Schaltbilder der Analysatoren sehen

anders aus (Abb. 10). Ausserdem besteht ein grundsätzlicher Unterschied in der Arbeitsweise. Der Helmholtzresonator lässt den gesamten Prüfklang an sich vorbeiziehen. Ist darin eine Frequenz enthalten, die nahe genug an der Eigenfrequenz des Resonators liegt, so schwingt dieser hörbar mit. Das elektrische Gerät lässt aber überhaupt nur einen Frequenzbereich des Prüfklanges durch, daher wird es sehr anschaulich Sieb genannt.

In der Praxis werden vielfach Oktav- und Terzsiebe verwandt, bei denen, wie der Name sagt, die Durchlassbreite eine Oktav oder eine grosse Terz ist. Der gesamte Messbereich wird in diese Intervalle unterteilt und eine Schaltung lässt zu, dass man nach Wahl je einen Intervallbereich aus dem Prüfklang heraussieben kann. Während sich Helmholtz seine Resonatoren Stück für Stück ans Ohr hielt, unterteilt man nunmehr den Prüfklang in einzelne Siebbereiche und schickt diese Stück für Stück zur Analyse weiter, z.B. durch einen Pegelschreiber, wie in dieser Arbeit. Das Band mit dem Prüfklang muss dabei jedesmal zurückgespult und erneut abgespielt werden. Für die vorliegende Arbeit wurde ein Terzsieb mit folgender Bereichseinteilung benutzt:

40 - 50 - 63 - 80 - 100 - 125 - 160 - 200 - 250 - 315 - 400 -
500 - 630 - 800 - 1000 - 1250 - 1600 - 2000 - 2500 - 3150 -
4000 - 5000 - 6300 - 8000 - 10 000 Hz.

Die Frequenzangaben beziehen sich auf die Bandmitte der Durchlassbereiche. Das 1000 Hz - Band lässt beispielsweise die Frequenzen von 885 Hz bis 1115 Hz durch. Das gilt aber nur innerhalb einer Dynamik von 3 dB. Bei grösseren dynamischen Be-

reichen verbreitert sich der Siebdurchlass. (Abb. 10a). Das hängt damit zusammen, dass sich die Funktion eines idealen Siebes in der Praxis nicht verwirklichen lässt. (Abb. 10b). Man nähert sich dem Ideal, indem man je drei Schwingkreise zu einer Filtereinheit koppelt. Das Schaltbild dieser Schwingkreise erscheint in der Abbildung 10. Die Frequenzkurven der Kreise und ihre resultierende Frequenzkurve zeigt die Abbildung 10c. Das Maximum ist hier, wie in der Abbildung 10a, eine sattelförmige Abflachung. Ideal wäre ein tatsächlich gerader Verlauf. Die Abweichung von diesem Ideal beträgt aber nirgends mehr als $\frac{1}{2}$ dB.

2.33 Der Pegelschreiber.

Für die vorliegende Untersuchung sind die Spannungen der Siebe mit einem Pegelschreiber aufgezeichnet worden. Das Gerät arbeitet nach dem Servoprinzip. Der Signalstrom wird einem Potentiometer zugeführt. Von dort wird die Spannung abgegriffen und über verschiedene Gleichrichter, Verstärker und Unterbrecher zu einem Elektromagneten weitergeleitet. Spannungsänderungen am Eingang des Gerätes erzeugen Ströme in dessen Magnetfeld, die ihrerseits zu Bewegungen zweier auf Schienen gleitenden, fest mit einander verbundenen Spulen führen. Mit denen ist ein metallenes Ärmchen starr verbunden, an dem ein Schreibstichel und der Potentiometerabgriff befestigt ist. Der bei der Spannungsänderung erzeugte Strom bewirkt eine Bewegung des Potentiometerabgriffes derart, dass durch die neue Stellung der Spannungsunterschied ausgeglichen wird. Damit erlischt der Strom. Der Weg zum Ausgleich - es braucht nicht immer der

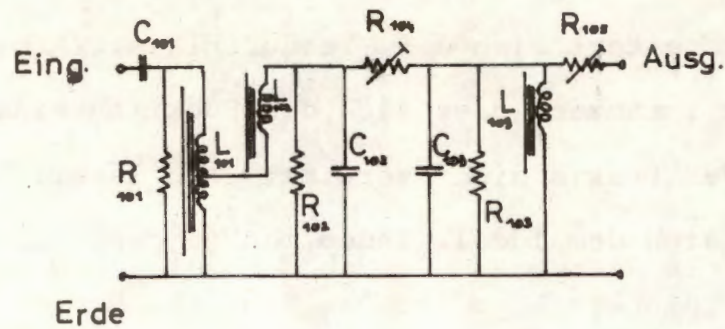


Abbildung 10

Das Schaltbild einer Siebeinheit. Die Schaltung besteht aus drei Schwingkreisen mit verschiedenen Kapazitäten, Induktivitäten und Widerständen.

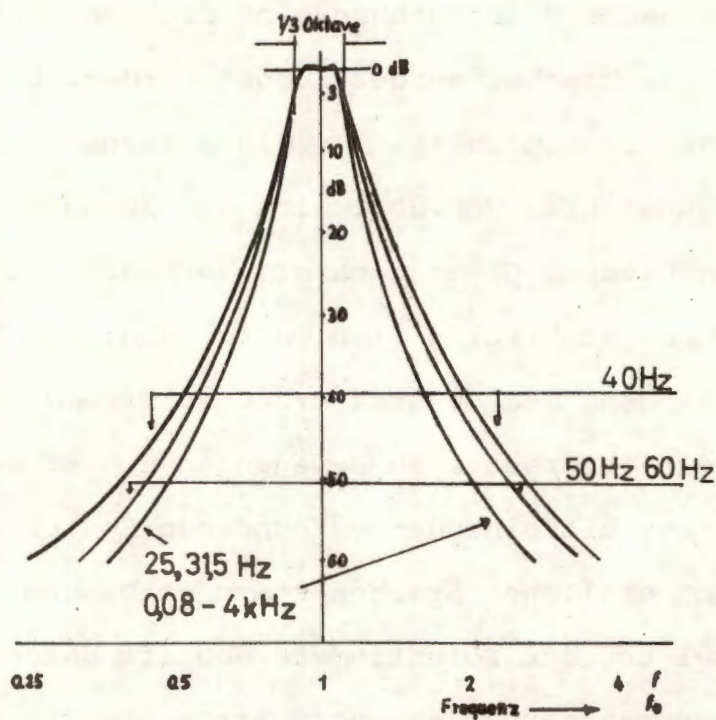


Abbildung 10a

Die Durchlassbreite des Terzsiebes ist nur bei einer Dynamik von 3 dB eine Dritteloktave. Mit zunehmender Dynamik wächst die Durchlassbreite unterschiedlich für verschiedene Frequenzen.

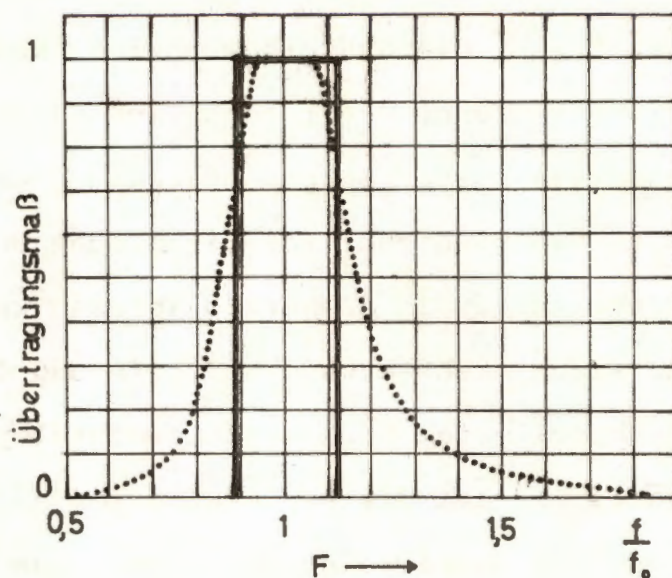


Abbildung 10b

Die Funktion eines idealen Siebes (ausgezogene Linie) ist nur näherungsweise zu verwirklichen (gepunktete Linie).

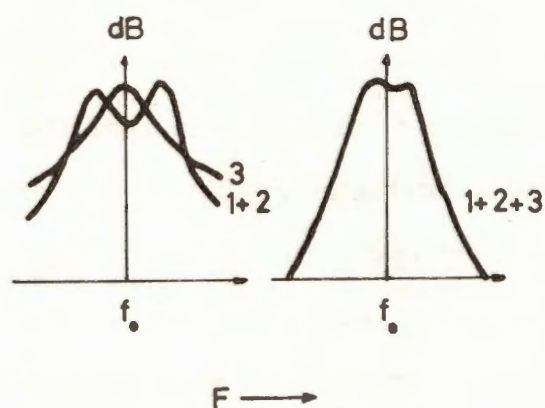


Abbildung 10c

Die resultierende Frequenzkurve der Schwingkreise 1, 2 und 3 ergibt eine Annäherung der idealen Filterkurve.

kürzeste zu sein - wird aber inzwischen aufgezeichnet. Bei geeigneter Wahl der einstellbaren Grössen, das sind der Potentiometerbereich, die Schreibgeschwindigkeit und der Papiervorlauf, ist dieser Weg tatsächlich der kürzeste und damit eine Darstellung der Spannungsänderung am Eingang des Gerätes selbst. Man bevorzugt logarithmische Potentiometer, da man dann Pegelkurven in dB-Werten ablesen kann.

Man sieht nicht etwa die Schwingung der Saiten. Von der amplitudenmodulierten Hochfrequenzwechselspannung am Eingang des Gerätes ist auf dem Papierstreifen nur eine positive Kurve zu sehen. Die Kurve folgt der Wurzel aus den Mittelwerten der ins Quadrat erhobenen niederfrequenten Signalspannung. Die Trägerspannung ist eliminiert. Zu sehen ist die relative Zunahme oder Abnahme der Signalspannung in einem für alle Siebe gleichen Massstab.

2.40 Der Arbeitsgang bei der Herstellung objektiver Klangbilder.

Die Klangbilder für die vorliegende Arbeit kamen nun so zustande, dass Aufnahmen mit Kondensatormikrophonen auf Tonband gespeichert wurden und später durch ein Terzsieb und einen Pegelschreiber geschickt wurden. Die Pegelkurven der Terzsiebe wurden dann über einander kopiert und ergaben Graphiken, die man kurzerhand Pegelpartituren nennen kann.

2.41 Die Aufnahmen.

Um den Raumeinfluss gering zu halten, wurde das Mikrophon nahe, 9 - 14 cm, an eine Saite gebracht. Die zu dieser Saite gehörige

Taste wurde von Gerät A angeschlagen. Glücklicherweise zeigte sich, dass sich die erzeugten Klänge innerhalb einer Dynamik von etwa 40 dB hielten. Der Anschlag wurde dann öfters wiederholt, jedesmal mit einer anderen Blockadehöhe des Gerätes A und gegebenenfalls auch des Gerätes B. Unter Blockadehöhe ist die Stelle zu verstehen, an der diese Geräte die Taste beziehungsweise das Dämpferpedal auf dem Rückweg in die Ruhelage festhalten. Die Blockadehöhe wurde von der Ruhestellung aus abwärts gemessen und daher mit negativen Vorzeichen in Millimetern angegeben.

Von Zeit zu Zeit wurde eine Aufnahme identisch wiederholt, um für später geeignetes Material zur Untersuchung der Wiederholbarkeit bereitzustellen. Ebenso wurden gelegentlich die Leistungen der Geräte A und B mit Hand und Fuss subjektiv nachgeahmt. Zum Vergleich wurden bei solchen Gelegenheiten nicht nur einzelne Töne sondern auch vierstimmige Dur-Akkorde in der Grundform gespielt.

Die Aufnahmen wurden in drei verschiedenen, leeren Konzertsälen mit Sitzplatzzahlen von etwa 300, 600 und 1200 gemacht. Die beteiligten Instrumente waren Flügel von Steinway & Sons, ein C- Modell im kleinen Konzertsaal und je ein D - Modell in dem mittleren und grossen Konzertsaal.

Da subjektiv beobachtet der Unterschied zwischen verschieden stark gedämpften Tönen in der tiefen Lage auffälliger als in den höheren Lagen ist, wurden anfangs viele Aufnahmen in tiefer Lage gemacht. Es zeigte sich bald, dass der entscheidende Befund unabhängig von der Frequenz war. Daher

wurden später nur wenige Stichproben pro Instrument gemacht, vor allem bei Wiederholungsaufnahmen, die notwendig wurden, wenn frühere Aufnahmen durch Kopiereffekte verdorben waren.

Die meisten Aufnahmen wurden nach zwei Sekunden abgebrochen, das Gerät A wurde dann von der Taste entfernt und bei dem Gerät B wurde das Hilfspedal getreten. In der Klavierliteratur sind Töne dieser Dauer ohnehin schon sehr selten. Längere können in dem Zusammenhang, für den diese Arbeit gedacht ist, keine Rolle spielen. Da bisher aber zur absoluten Dauer von Klaviertönen beim Literaturspiel keine statistische Untersuchung bekannt geworden ist, wurde in einer kleinen Spezialstudie je eine Seite eines langsamen Satzes von J.S. Bach, W.A. Mozart, L.v. Beethoven und J. Brahms untersucht und ausgezählt. 1.5% aller Klänge waren tatsächlich etwa 2 s lang zu hören. Klänge von grösserer Dauer gab es nicht. Etwa 55% der Klänge waren dagegen 250 ms lang zu hören. Es schien deshalb berechtigt, Klänge meist nach ungefähr 2 s abubrechen. Für Vergleichszwecke wurden jedoch einige Klänge bis zum völligen Verklängen aufgenommen und analysiert.

2.42 Die Analysen.

Bei der Analyse wurden die Aufnahmen einem Terzsieb zugeführt und von dort einem Pegelschreiber. Auch in diesem Arbeitsgang wurde von Zeit zu Zeit eine Messung wiederholt, um die Untersuchung der Wiederholbarkeit zu ermöglichen.

Anfangs wurden alle Siebe ausgemessen. Es zeigte sich aber bald, dass die Bereiche oberhalb 4 kHz unbedeutend

waren. Es gab dort allenfalls Spitzen beim Anschlag selbst. Der Energieabfall war aber so steil, dass für einen Unterschied von gedämpften und ungedämpften Tönen kein Raum verblieb. Daher wurden die Messungen meistens bei 4 kHz abgebrochen. Der Papiervorlauf wurde auf 30 mm/s gestellt. Zum Vergleich wurden einzelne Aufnahmen bei höherem und niedrigerem Papiervorlauf aufgezeichnet.

2.50 Die Klangbilder

Die Abbildung 10 zeigt eine typische Pegelpartitur.

Die Pegelkurven der einzelnen Siebe sind von unten nach oben übereinander geschichtet. Der Bereich um 50 Hz ist in der untersten Kurve wiedergegeben. Die höheren Bereiche folgen nach der bei 2.32 gegebenen Liste. Der Bereich um 4000 Hz ist der oberste. Da die Bereiche der Siebe für alle Abbildungen dieselben bleiben, sind nur die Ordnungszahlen der Siebe eingetragen.

Der senkrechte Strich links dient als Anhaltspunkt bei der Zeichnung. Die Pegelkurven werden jeweils so gelegt, dass der Strich durch den Punkt geht, in dem der Anstieg aus der Ruheebene beginnt. Der Anstieg selbst ist nicht eingezeichnet. Er gehört hier nicht zur Sache und würde daher das Bild unnötig komplizieren. Die Pegelkurven beginnen alle mit dem ersten Maximum.

Vom Maximum verlaufen die Kurven nach rechts zunächst in flacher Neigung abwärts. Dann machen sie einen Knick und fallen nunmehr steil ab. Der betreffende Klang, ein A,, (27,5 Hz), war nach zwei Sekunden mit dem vollen Gewicht des Dämpfers beendet worden. Davor war der Dämpfer aber völlig von der Saite abgehoben, sodass in den ersten beiden Sekunden der natürliche Energieabfall des Klanges erscheint.

Es fällt auf, dass die Neigung des Abfalles im gedämpften und ungedämpften Fall von Sieb zu Sieb verschieden ist. Gänzlich eigne Wege gehen die Kurven der Siebe 16 bis 20. Mit zunehmender Ordnungszahl wird dort der Abfall immer

steiler und die Kurven erreichen lange vor denen der anderen Siebe die Ruheebene.

Beim 18. Sieb zeigt sich ausserdem eine eigenwillige Reaktion auf den Dämpferansatz. Während zu diesem Zeitpunkt namentlich in den tiefen Sieben ein steiler abfall beginnt, kommt es hier zu einem plötzlichen Anstieg. Nach einem spitzen Maximum verhält die Kurve auf einem Niveauplateau halber Höhe für einige Zehntelsekunden und fällt dann in die Ausgangslage zurück. Man könnte das Ganze für ein Sympton des Kopiereffekts halten, dem es allerdings zum verwechseln ähnlich sieht. Dagegen spricht aber, dass die Erscheinung in den anderen Sieben fehlt. Tatsächlich handelt es sich um eine charakteristische Reaktion auf den Dämpferaufsatz, die in vielen Aufnahmen beobachtet werden konnte.

Die Kurve des dritten Siebes verläuft so, als habe jemand mit ruhiger Hand aber ohne Lineal eine Gerade ziehen wollen. Alle anderen Kurven zeigen einen zittrigen Stil. Auffällig ist besonders, dass die Kurve des siebten Siebes im ungedämpften Teil Modulationen zeigt, dass sie aber im gedämpften Teil - übrigens erheblich sanfter als alle anderen Kurven - glatt abfällt. Auch die Kurve des zweiten Siebes ändert deutlich die Art der Gliederung beim Dämpferaufsatz. Die dreizehnte Kurve tut das dagegen offensichtlich nicht. Die Amplitude der Modulation kann bis zu 4 dB betragen. Manche Kurven, die achte, elfte und dreizehnte, in geringerem Masse auch die sechste, zeigen periodische Zu- und Abnahmen der Modulation, bei der fünften, neunten und zwölften bleibt diese konstant.

Von der zwölften Kurve aufwärts zeigen sich im

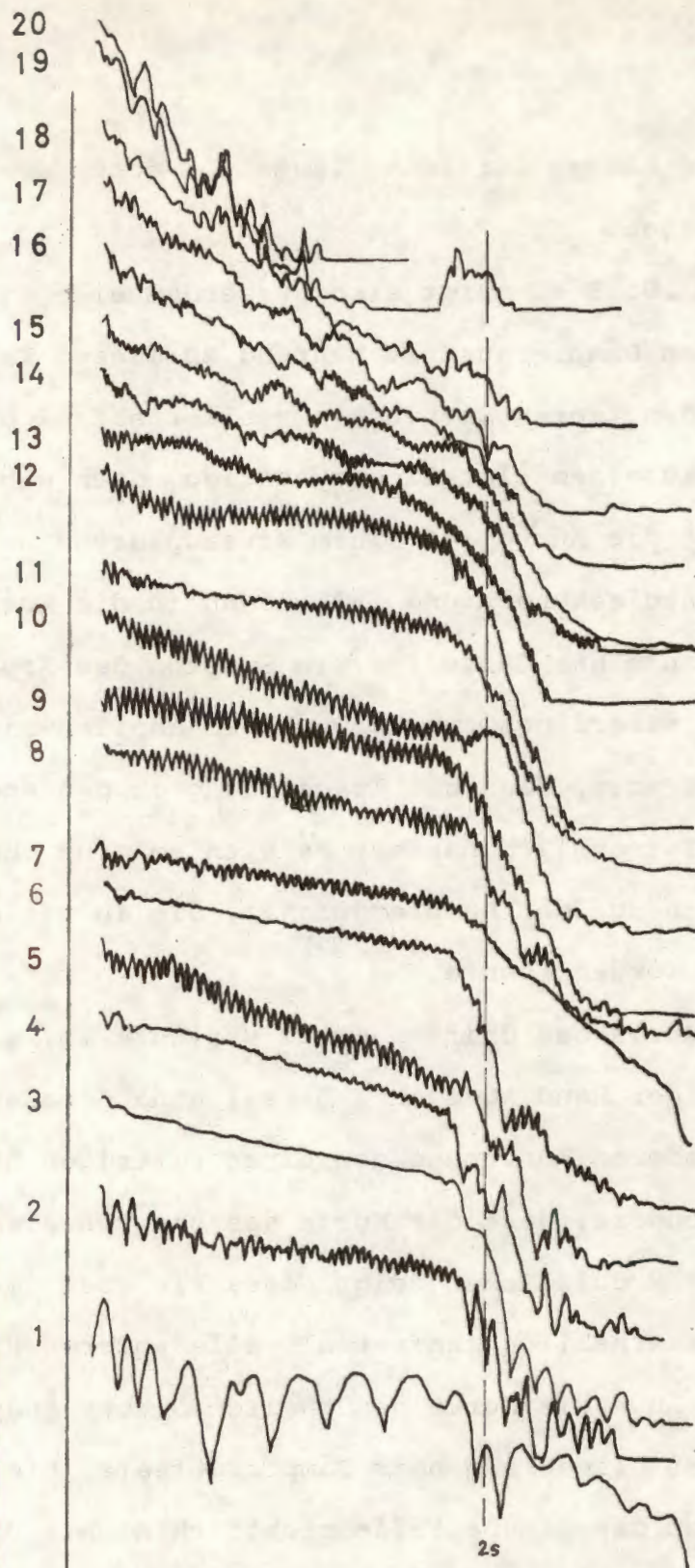


Abbildung 10

Eine Pegelpartitur des Tones A,, (27,5 Hz).

Die Blockadehöhe des Anschlagsgerätes A war so bemessen, dass der Dämpfer nach dem Anschlag ausser Kontaktbereich mit der Saite blieb. Nach zwei Sekunden wurde er dann fallengelassen. Das Dämpferpedal wurde nicht betätigt.

ungedämpften Teil Wellenzüge, die mit zunehmender Ordnungszahl der Kurven stürmischer und unregelmässiger werden. Umgekehrt zeigen die Kurven zwölf bis sechzehn verhältnismässig ruhige Abfälle im gedämpften Teil, während es gleichzeitig in den unteren Kurven stürmischer zugeht. Die Kurven zwei, drei, vier und fünf zeigen in diesem Teil eine auffallende Ähnlichkeit mit den Kurven achtzehn, neunzehn und zwanzig.

2.51 Die Abbildung 11 zeigt denselben Ton (A_0 27,5 Hz) diesmal von Anfang an so gedämpft, dass er subjektiv beobachtet nach zwei Sekunden verklungen ist. Die Töne von den Abbildungen 10 und 11 sind also subjektiv gleichlang. Trotzdem zeigen sich manche Unterschiede.

Wie zu erwarten ist der Abfall bei Abbildung 11 in allen Sieben steiler. Der Unterschied zu Abbildung 10 ist in den obersten Sieben gering und nimmt nach unten stark zu. Was sich bei Abbildung 10 im gedämpften Teil zeigt, gilt hier für die volle Dauer des Tones: die oberen Siebe werden geglättet, die unteren werden dagegen stürmisch erregt. Ein Beispiel dafür ist das dritte und vierte Sieb der Abbildung 11. Eigentümlicherweise ist das erste Sieb dort sehr viel ausgeglichener als in Abbildung 10.

Modulation ist bei Abbildung 11 vorhanden, allgemein aber geringerer Amplitude. Beim zweiten Sieb zeigt sich ein völlig neuer Schreibstil, der auch im gedämpften Teil von Abbildung 10 nicht enthalten war.

Die siebte Kurve ist in beiden Fällen diejenige mit dem relativ sanftesten Abfall. Der Unterschied im Vergleich mit anderen Kurven ist bei der Abbildung 11 aber geringer. Dort

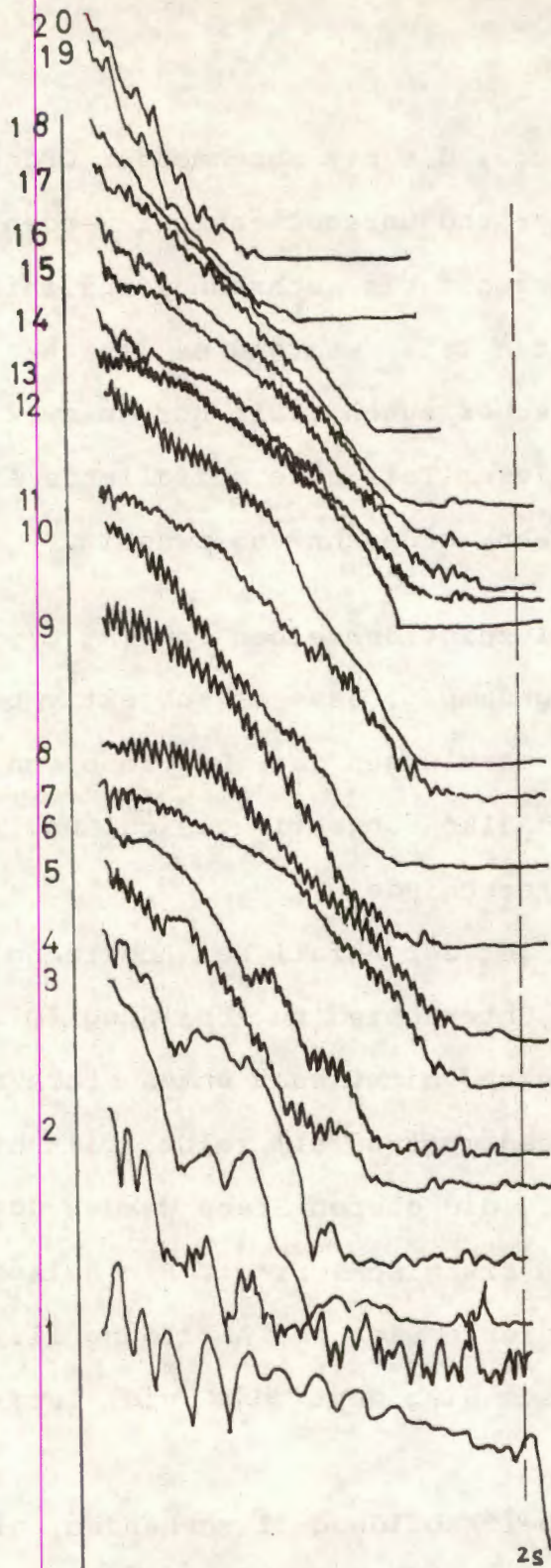


Abbildung 11

Der Ton A,, (27,5 Hz) gedämpft. Die Blockadehöhe des Gerätes A war so gewählt, dass der Ton für subjektive Beobachtung nach zwei Sekunden endete. Das Dämpferpedal wurde nicht betätigt.

zeigen die Kurven sieben, acht, dreizehn, fünfzehn und sechzehn etwa die gleiche Rundung. Mehr als in Abbildung 10 fällt auf, dass die Kurven zu unterschiedlichen Zeitpunkten die Ruheebene erreichen. Waren dort nur die obersten Siebe vor der Zeit in der Ruhelage, so sind es hier die obersten und die untersten sechs Siebe. Ganz allgemein verlaufen die Kurven von Abbildung 10 mehr geradlinig während die Kurven von Abbildung 11 gewölbt sind. Die Kurven sieben, acht, neun, dreizehn und fünfzehn zeigen das besonders deutlich.

Es scheint, als ob das Ohr subjektiv die Dauer des Tones nicht nach Pegelwerten misst. Bei Abbildung 10 fällt der Dämpfer erst nach zwei Sekunden auf die Saite. Obwohl nun erst der Ton abgebaut wird, entsteht subjektiv der Eindruck, der Ton sei sofort zu Ende. Bei Abbildung 11 sind nur die wenigsten Siebe nach zwei Sekunden noch oberhalb der Ruheebene. Trotzdem hört das Ohr den Ton erst dann enden.

2.511 Die Abbildung 12 ist aus den Abbildungen 10 und 11 gewonnen. Die Abfälle der Pegelkurven während der ersten Sekunde sind zu Geraden idealisiert und eingezeichnet worden, derart, dass die zwei Geraden mit derselben Siebnummer aus Abb. 10 und Abb. 11 vom gemeinsamen Maximum aus einen Winkel bilden. An die Geraden des untersten Winkels sind geometrische Figuren angehängt, die das Verfahren einer späteren Messung veranschaulichen. Hier gehören sie nicht zur Sache.

Die Winkel sind offenbar verschieden gross. Aber nur für die obersten sieben lässt sich eine Regel angeben. Etwa die, dass mit zunehmender Ordnungszahl der Siebe die Winkel spitzer werden. Dazu wäre das zwanzigste Sieb aber bereits

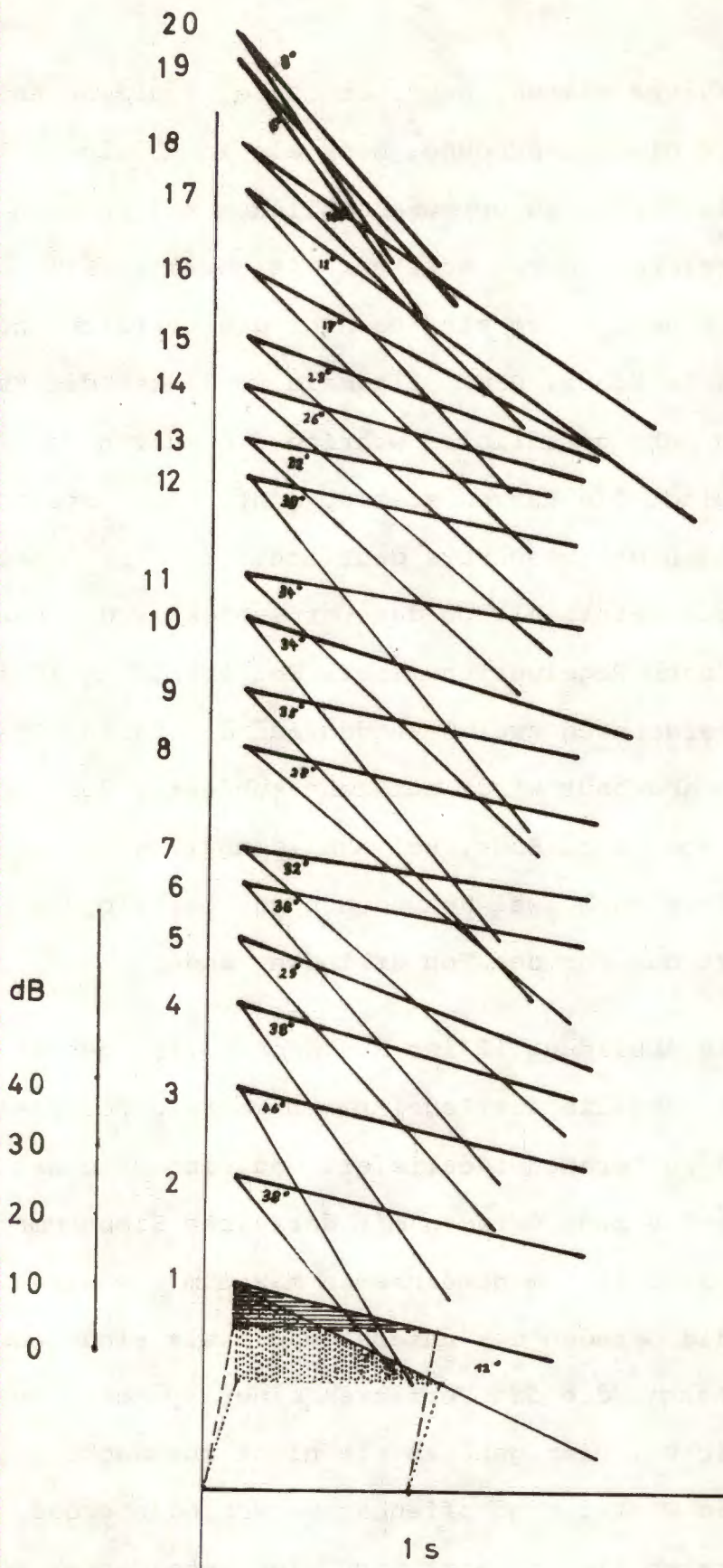


Abbildung 12

Die Kurven der Abbildungen 10 und 11 wurden zu Geraden idealisiert.

Dann wurden die Geraden derselben Siebe am gemeinsamen ersten Maximum vereinigt.

eine Ausnahme. Weiter lässt sich keine Gesetzmässigkeit finden. Der stumpfeste Winkel ist der beim dritten Sieb mit 46 Grad. Die Siebe zwei, vier, sechs und zwölf haben Winkel von 38 Grad. Das neunte Sieb hat 35 Grad, das zehnte und elfte 34, das siebte und dreizehnte 32, das fünfte 29, das achte 28, das vierzehnte 26 und dann kommen schon die schmalere Winkel der höchsten Siebe. Einen auffällig spitzen hat das erste Sieb mit 12 Grad. Der Durchschnitt aller Winkel beträgt 26,8 Grad.

2.512 Die Abbildung 13 zeigt eine Aufnahme unter denselben Versuchsbedingungen wie die der Aufnahme zur Abbildung 11. Der Unterschied ist lediglich, dass die Blockade der Taste auf dem Rückweg in die Ruhelage nur für wenige Zehntelsekunden aufrecht erhalten wurde. Danach wurde die Taste von Hand wieder tief ins Tastenbett gedrückt, sodass der Dämpfer völlig ausser Kontaktabstand mit der Saite geriet. Zwei Sekunden nach dem Anschlag wurde schliesslich der Ton beendet, indem man die Taste in die Ruhelage zurückschnellen liess.

Eigenartig ist, dass sich die Änderungen der Versuchsbedingungen in manchen Sieben deutlich, in anderen eben merkbar und in wieder anderen überhaupt nicht zeigen. Zur ersten Gruppe gehören die Kurven 2, 3, 6, 10 und 15. Es fällt auf, dass die Veränderung der Bedingungen in den Kurven keineswegs gleichzeitig erscheint. Zur zweiten Gruppe gehören die Kurven 1, 4, 5, 7, 9, 11, 12 und 13. Die restlichen Kurven sind indifferent.

In der ersten Gruppe tritt bei den Kurven 2, 3, 6 und 15 der Fall ein, dass eine Kurve wieder ansteigt, nachdem sie vorher durch den Dämpfer auf ein niedrigeres Niveau

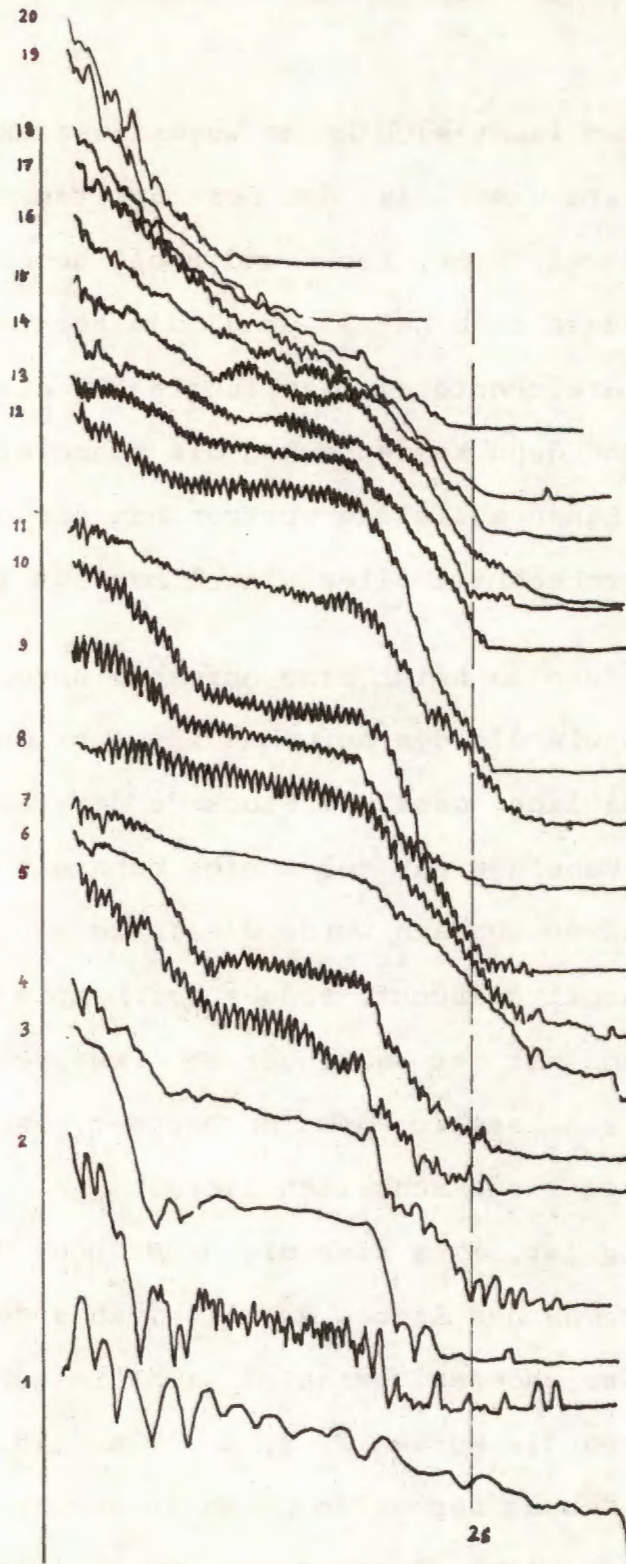


Abbildung 13

Wie bei Abb. 11 wird A,, (27,5 Hz) gedämpft. Die Taste wird dann aber wieder ins Tastenbett zurückgesenkt bis zwei Sekunden nach dem Anschlag der Ton beendet wird.

Das Dämpferpedal wurde nicht betätigt.

herabgezwungen wurde. Die Kurve 7 bestätigt die frühere Beobachtung, dass sie nämlich auf den Dämpfer reagiert, indem sie ihren Schreibstil ändert. Sie verliert ihre Modulation. Ansonsten bleibt sie ihrem Rufe, den sanftesten Abfall zu haben, treu.

2.513 Die Abbildung 14 zeigt noch einmal den Ton A,, (27,5 Hz), diesmal mit den Geräten A und B erzeugt. Das Dämpferpedal wurde vor dem Anschlag heruntergetreten und von Gerät B in dieser Stellung festgehalten. Zwei Sekunden nach dem Anschlag wurde die Blockade aufgehoben. Das Pedal wurde schnell aber kontrolliert in die Ruhelage entlassen.

Im Vergleich mit Abbildung 10 zeigen sich hier sehr viel unruhigere Linien, vor allem in den Sieben 3-8 und 16-18. Bei Aufnahme 10 ist die Neigung abwärts im ungedämpften Teil etwas steiler als hier. Das wird aber erst ersichtlich, wenn man die Kurven unmittelbar beieinander sieht. Daher ist in Abbildung 15 je eine idealisierte Kurve aus Abbildung 10 und aus Abbildung 14 vom gemeinsamen ersten Maximum aus eingezeichnet.

Wieder fällt der besonders lange Abstieg der Kurve des siebten Siebes auf. Bei den meisten anderen Sieben ist der Abstieg im gedämpften Teil steiler in der punktierten Kurve als in der ausgezogenen Kurve.

2.514 Die Abbildung 16 ist ein Gegenstück zur Abbildung 11.

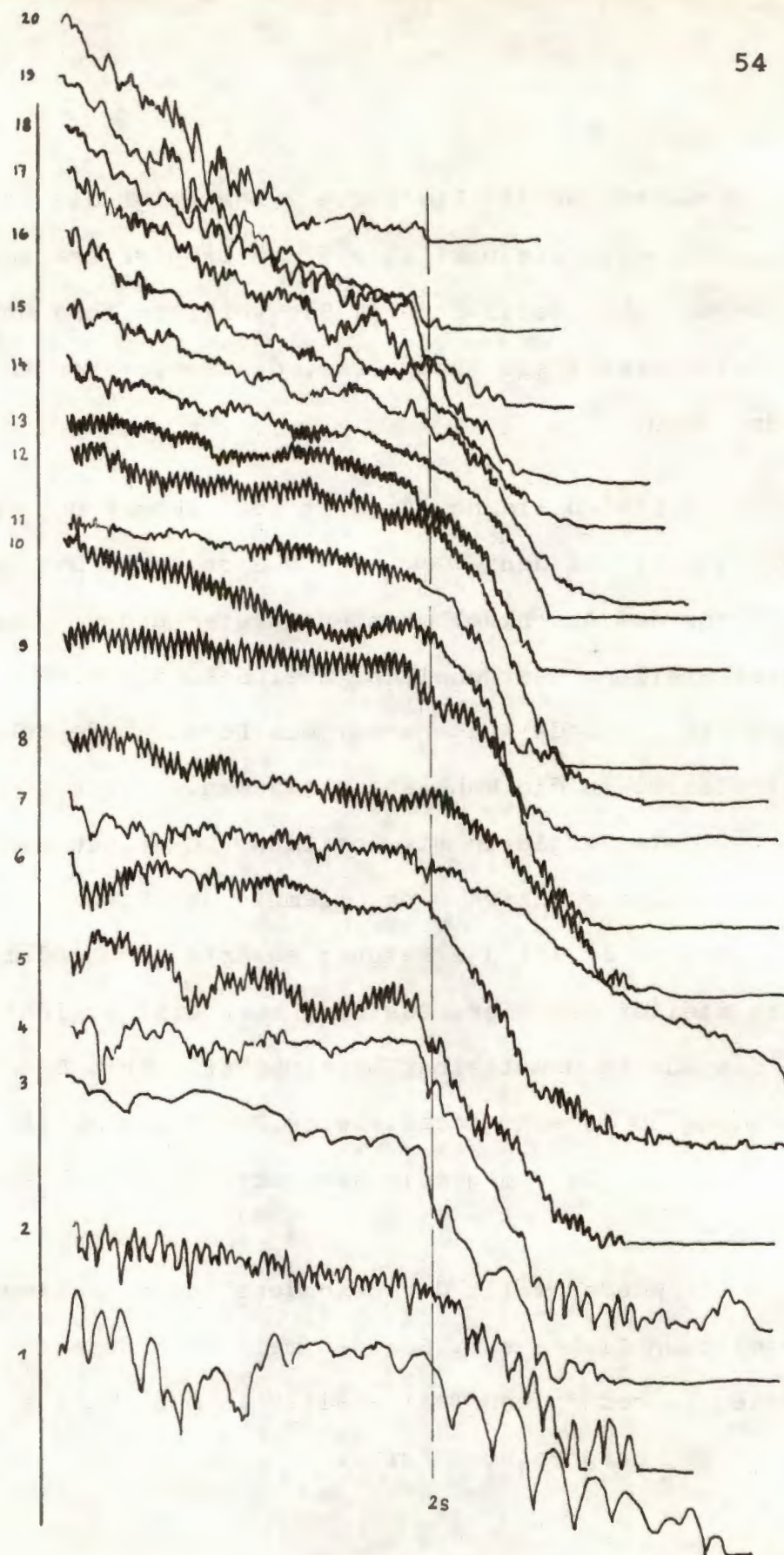


Abbildung 14

Der Ton A,, (27,5 Hz). Vor der Aufnahme ist das Dämpferpedal durchgetreten und von Gerät B blockiert worden. Zwei Sekunden nach dem Anschlag wurde die Blockade aufgehoben.

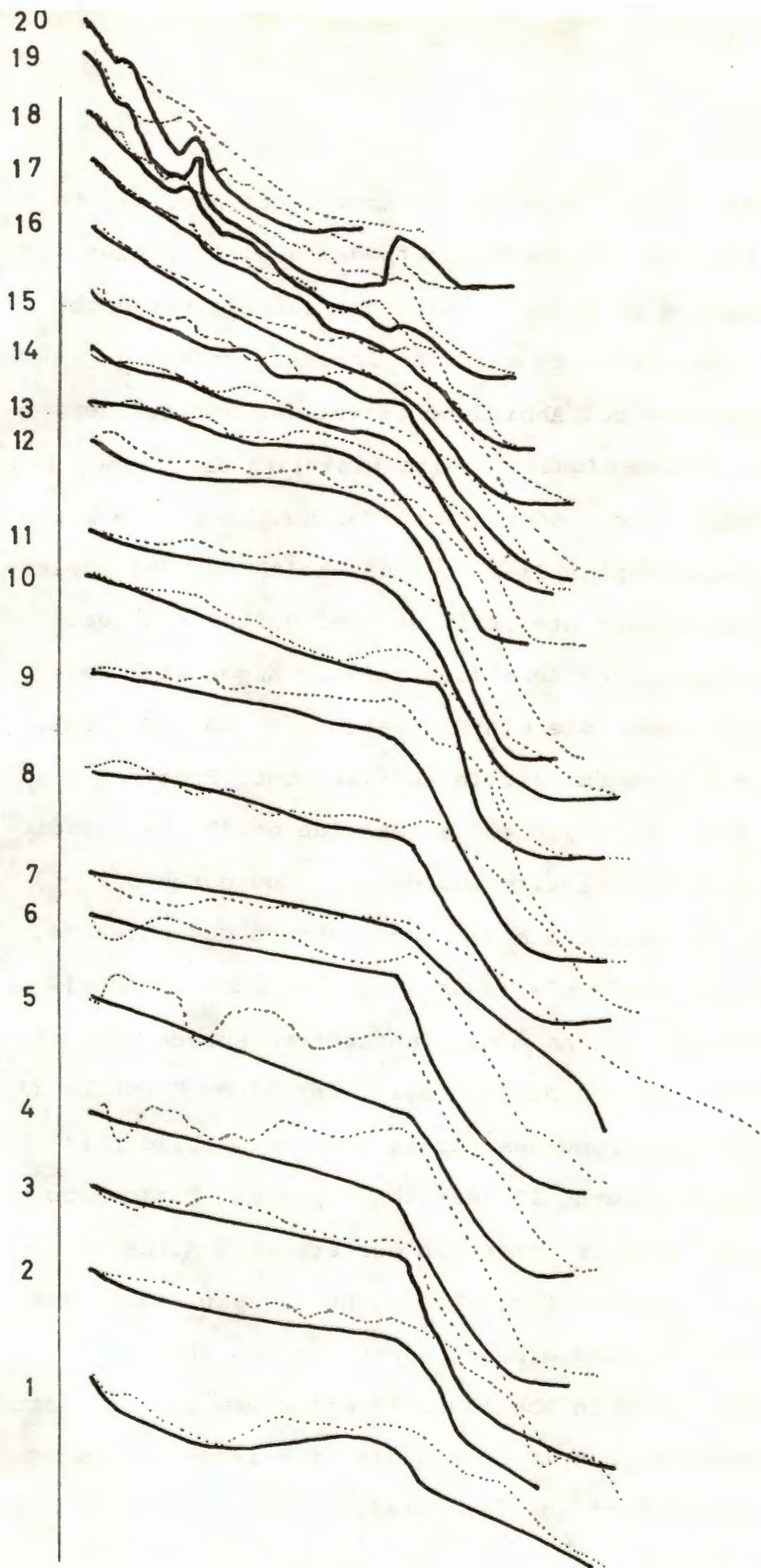


Abbildung 15

Die Kurven aus den Abbildungen 10 (durchgezogen) und 14 (punktiert) zum Vergleich zusammengelegt.

Beidemal ist der Ton A,, (27,5 Hz) gedämpft, bei Abb. 11 von der Taste aus, bei Abb. 16 vom Dämpferpedal aus. Auch hier ist der Grad der Dämpfung so gewählt, dass bei subjektiver Beobachtung der Ton zwei Sekunden nach dem Anschlag endet.

Überraschend bei Abbildung 16 ist der Verlauf der Kurven nach zwei Sekunden (gestrichelte Linie). In den Sieben 1-6 und 16-18 erscheinen die sonderbarsten Maxima. Hier, wie bei Abbildung 10 im neunzehnten Sieb, ist das kein Werk des Kopiereffekts sondern eine Charakteristik des gedämpften Klanges.

Im Übrigen zeigt Abbildung 16 alle Eigenarten des pedalgedämpften Klanges, wie ein Vergleich mit Abb. 14 zeigt, nämlich unruhige Linien und steile Abfälle gegen Ende des Tones. Typisch ist die verschiedene Reaktion der Siebe auf die Dämpfung. Kurven wie die zweite und dritte sind durch die Dämpfung stärker abgelenkt als die sechzehnte und siebzehnte. Die Kurve sieben verläuft hier anders als bei vorigen Abbildungen. Sie erreicht gemeinsam mit den anderen Kurven die Ruheebene und zeigt ausserdem einen auffällig unruhigen Schreibstil.

Zur Erleichterung des Vergleiches der Abbildungen 14 und 16 ist die Abbildung 17 gezeichnet worden. Darin wird die Differenz der Abfälle innerhalb der ersten Sekunde gezeigt. Im Gegensatz zur analogen Abbildung 12 zeigt sich hier eine deutliche Bevorzugung grosser Winkel in den unteren Sieben. Die Winkel sind in Abbildung 17 mit einem Durchschnitt von 17,8 Grad wesentlich spitzer als die Winkel der Abbildung 12 mit ihrem Durchschnitt von 26,8 Grad.

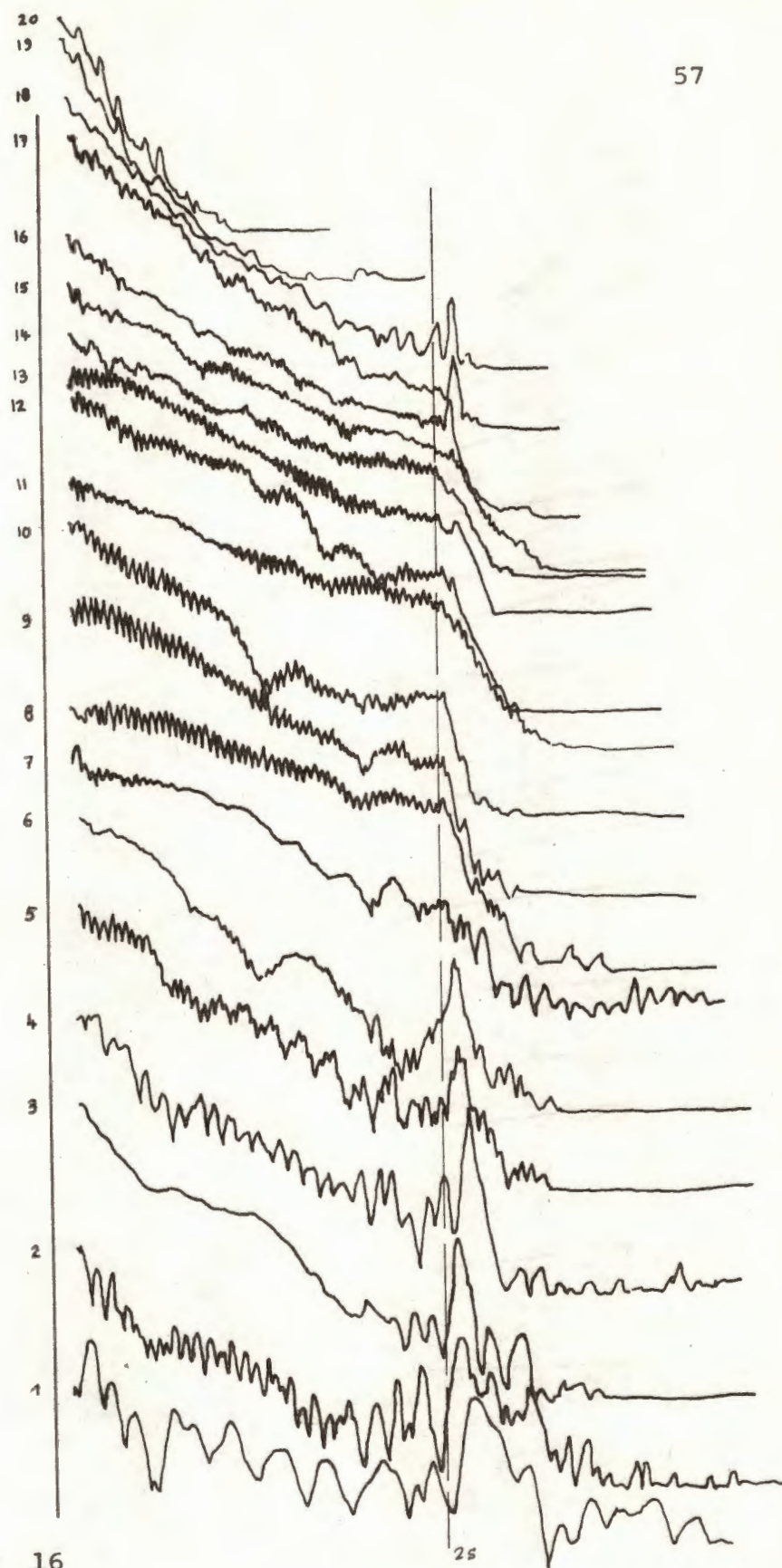


Abbildung 16

A,, (27,5 Hz) mit dem Dämpferpedal auf eine Tondauer von zwei Sekunden subjektiver Wahrnehmung gedämpft. Das Pedal wurde vor dem Anschlag durchgetreten und von Gerät B auf einer empirisch ermittelten Blockadehöhe festgehalten. Zwei Sekunden nach dem Anschlag endete der Klang ohne weiteren Eingriffe.

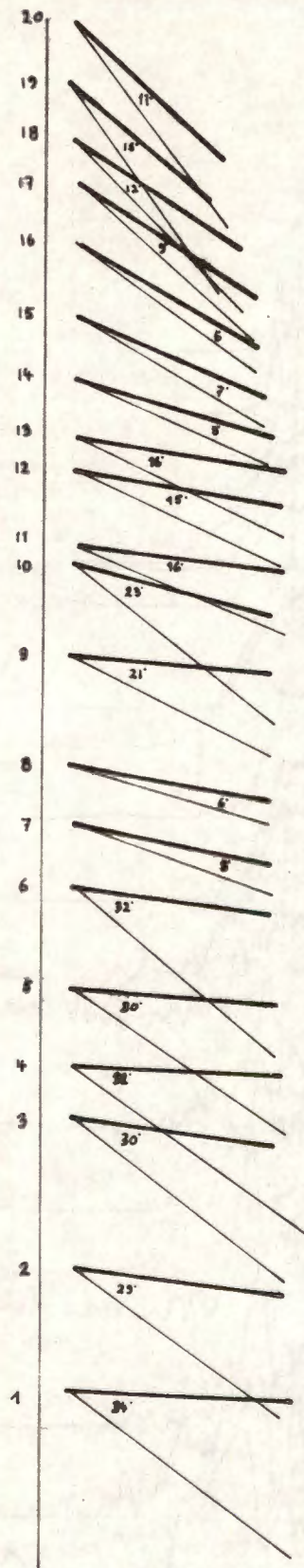


Abbildung 17

Das Gefälle der Pegelkurven aus den Abbildungen 14 (starke Linien) und 16 (feine Linien) innerhalb der ersten Sekunde nach dem Anschlag.

2.515 Die Abbildung 18 ist wie die Abbildung 13 zustande gekommen. Nur die Dämpfung erfolgte nicht über die Taste sondern über das Dämpferpedal. Vor dem Anschlag wurde das Pedal wie bei Abbildung 16 eingestellt. Wenige Zehntelsekunden nach dem Anschlag wurde das Pedal aber völlig durchgetreten. Zwei Sekunden nach dem Anschlag wurde der Ton schliesslich beendet, indem man das Pedal kontrolliert in die Ruhelage zurückschnellen liess.

Der Unterschied zwischen den Abbildungen 14 und 18 ist bei weitem nicht so augenfällig, wie der zwischen den Abbildungen 14 und 16. Trotzdem ist er beträchtlich. Die Kurven 2, 3, 4, 6 und 12 zeigen drei Teile. Einen gedämpften Teil I, gekennzeichnet durch steile Abfälle, einen ungedämpften Teil II mit nahezu waagrechten Kurvenstücken und einem gedämpften Teil III, der an den gedämpften Teil der Kurven aus Abbildung 14 erinnert. Im ungedämpften Teil kommen Anstiege vor, sehr auffällig bei Kurve 6, eben wahrnehmbar bei den Kurven 2 und 4. Die Kurve 7 erinnert mit ihrem flachen Abfall wieder an vorige Abbildungen. Alle bisher nicht genannten Kurven lassen die Abbildung 18 bei flüchtiger Betrachtung wie eine Wiederholung der Abbildung 14 erscheinen. Erst wenn man die Kurven sorgfältig vergleicht, zeigt sich, dass bei Abbildung 18 das gesamte Energieniveau niedriger als bei Abbildung 14 ist. Die Abbildungen 18 und 13 haben gemeinsam, dass sich die besonderen Zustände der Dämpfung nur in wenigen Kurven anschaulich zeigen. Unerwartet dabei ist, dass diese Kurven nicht alle aus denselben Sieben stammen, wie ein Vergleich der Kurven 9 und 10 beider Abbildungen zeigt.

2.516 Die folgenden Drei Abbildungen sollen die Untersuchung des Klangbildes von A,, (27,5 Hz) abschliessen. Die Abbildung 19 zeigt den Ton beim ungestörten Verklängen. Bis zum Dämpferaufsatz zwei Sekunden nach dem Anschlag sind die Kurven der Abbildung 10 deckungsgleich mit denen dieser Abbildung. Die einzige Ausnahme ist die Kurve aus dem ersten Sieb, wo sich für wenige Zehntelsekunden eine Abweichung zeigt. Möglicherweise geht das auf eine geringe Störung während der Aufnahme zurück.

Deutlicher als bei der Abbildung 10 sind in den oberen Kurven Wellenzüge zu sehen, die mit steigender Frequenz der Siebe kürzere Perioden zeigen. Die Abbildungen 20 und 21 stammen aus einer anderen Versuchsreihe mit einem kleineren Instrument (Modell C im Gegensatz zu dem bisher verwandten Modell D, beides Flügel von Steinway & Sons). Sie zeigen ebenfalls Aufnahmen des Tones A,, (27,5 Hz), einmal frei ausklingend, zum andern mal gedämpft. Der Pegelschreiber war bei der Aufzeichnung auf 3 mm/s Papiervorlauf eingestellt und lieferte daher einen sehr viel grösseren Teil des Abklingvorganges auf kleinerem Raum.

Wieder zeigen sich die Wellenzüge, hier selbstverständlich stark zusammengedrängt. Weiter bestätigt sich die frühere Beobachtung, dass manche Kurven im gedämpften wie ungedämpften Zustand des Tones sanftere Abfälle haben als andere. Die schon vielfach aufgefallene Kurve des siebten Siebes gehört hier dazu, ebenso Kurve 8 und 11, letztere vor allem in der gedämpften Form von Abbildung 21.

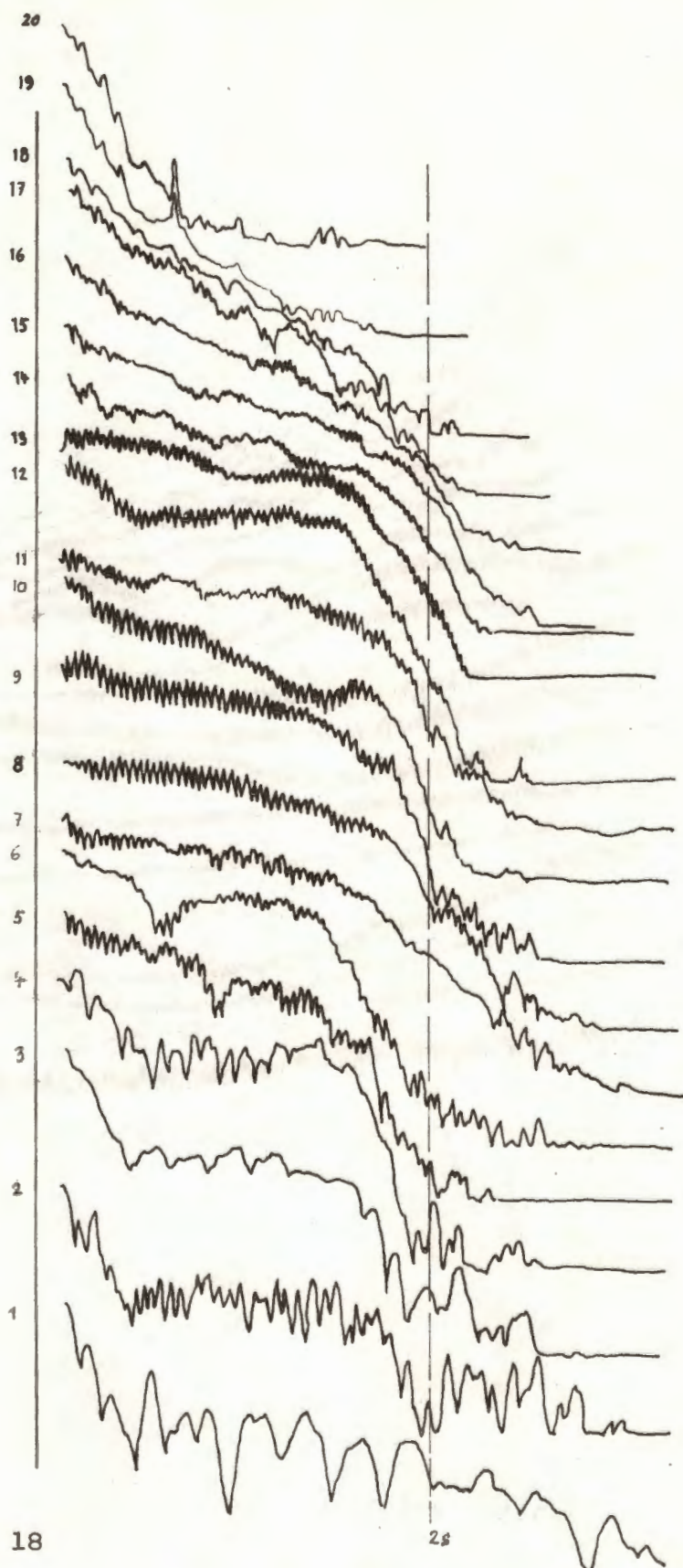


Abbildung 18

Der Ton A,, (27,5 Hz) wurde über das Dämpferpedal für wenige Zehntelsekunden gedämpft. Die Dämpfung wurde dann aufgehoben und zwei Sekunden nach dem Anschlag wieder mit vollem Gewicht niedergesetzt. Beim Anschlag stand das Gerät B in derselben Stellung wie bei der Aufnahme zu Abbildung 16.

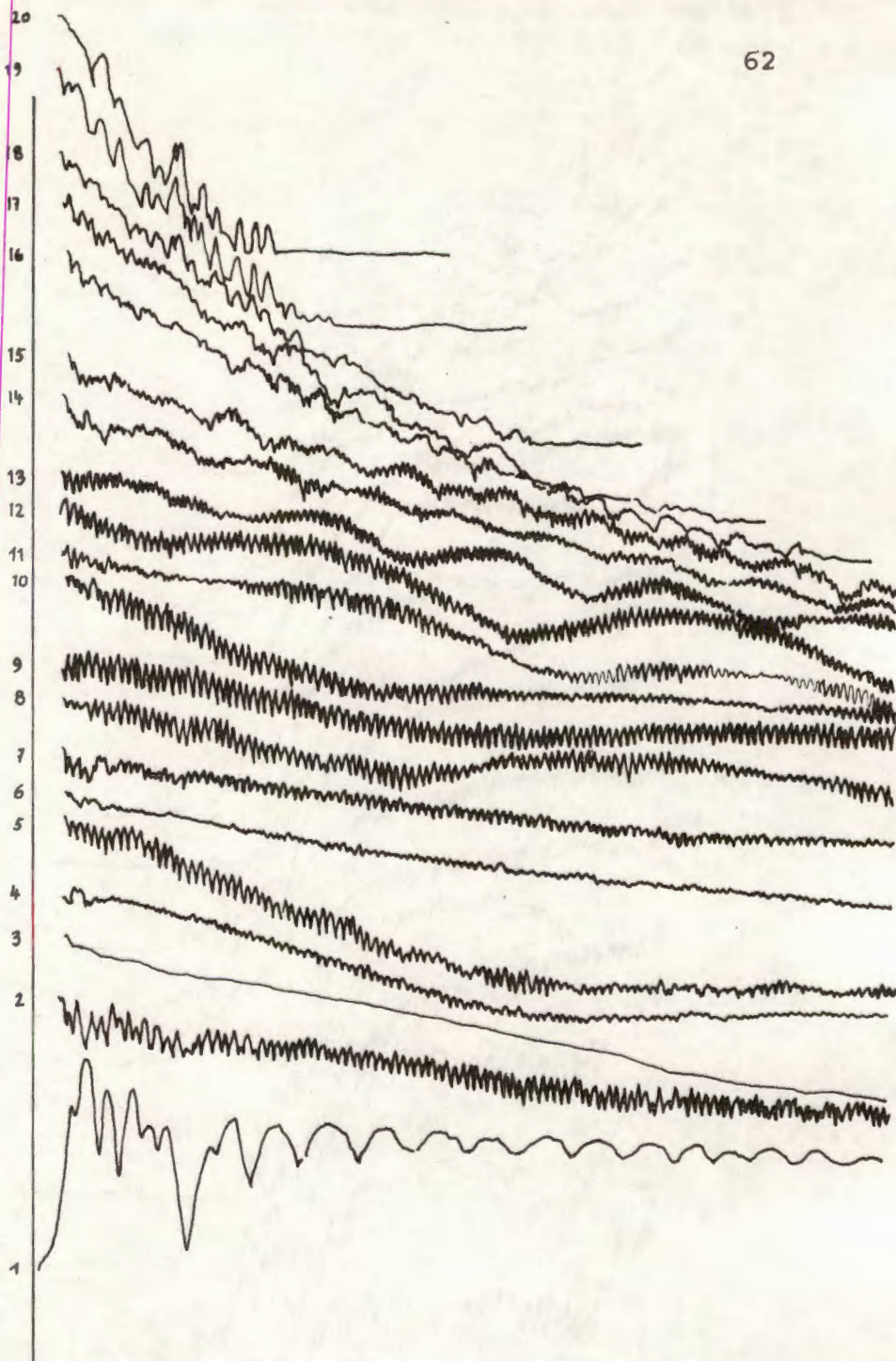


Abbildung 19

A,, (27,5 Hz) verklingt ungedämpft.

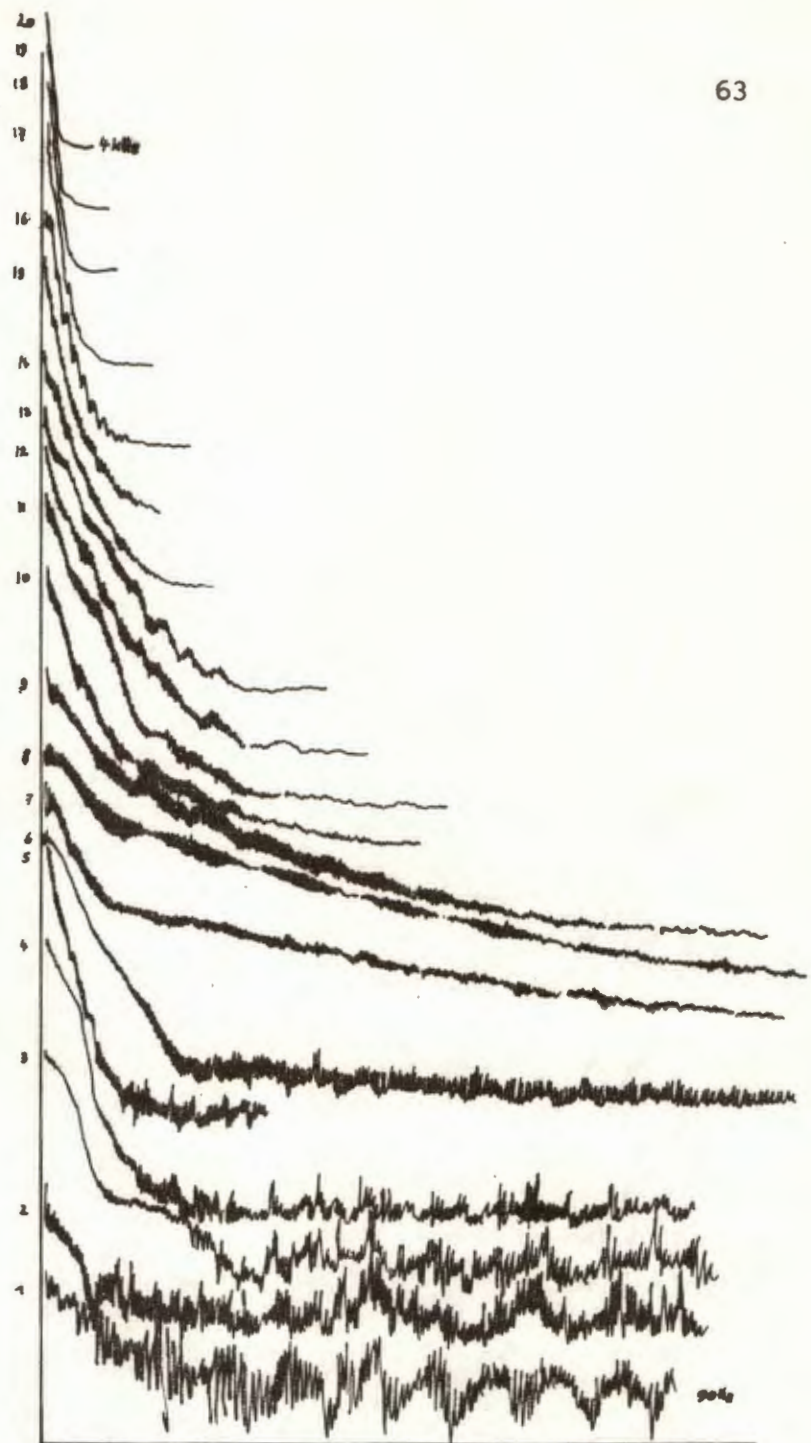


Abbildung 20

A,, (27,5 Hz) verklingt ungestört. Die Aufnahme stammt aus einer anderen Versuchsreihe und ist mit 3 mm/s Papiervorlauf aufgezeichnet.

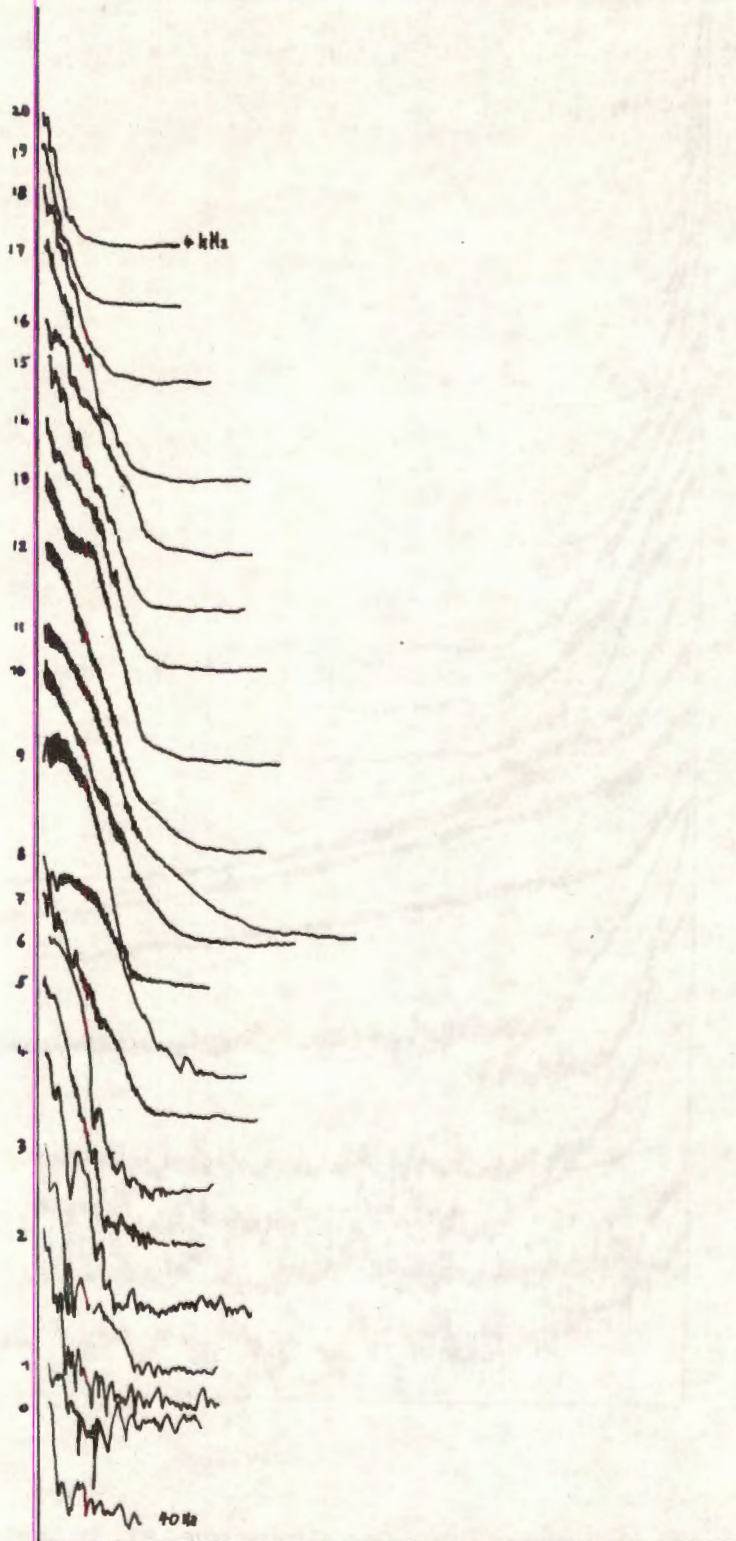


Abbildung 21

A,, (27,5 Hz) gedämpft. Auch hier 3 mm/s Papiervorlauf.

2.52 Bisher waren alle Beispiele aus der tiefsten Lage des Flügels genommen. Dort sind die Verhältnisse am übersichtlichsten. Analysiert man Flügeltöne in der befolgten Weise auch in höheren Lagen, so bleiben die Verhältnisse grundsätzlich dieselben. Das Spektrum vom jeweiligen Grundton aufwärts gemessen wird allerdings relativ schmaler und die Pegelkurven werden unruhiger.

2.521 Die Abbildung 22 zeigt ein Gegenstück zur Aufnahme 10. Die betroffene Taste ist a (220 Hz). Ein Vergleich zwischen den Abbildungen zeigt:

Abb. 10

Kurven 1 - 6 höher

Kurven 8 & 9 höher

Kurve 10 fällt steiler

Kurve 11 fällt flach

Kurve 12 etwa gleich

Kurve 13 flacher

Kurve 14 etwa gleich

Kurve 15 etwa gleich

Kurve 16 anfangs gleich
später steiler

Kurve 17 & 18 anfangs gleich
später viel steiler

Kurve 19 & 20

flacher, fällt steiler

Abb. 22

Kurven 1 - 6 flacher (nur
Anfangs- und Dämpferaufsatz-
reaktionen)

Kurven 8 & 9 flacher, drei-
teilig: stark ged. - schwach
ged. - stark ged.

Kurve 10 fällt flacher

Kurve 11 fällt flach

Kurve 12 etwa gleich

Kurve 13 steiler

Kurve 14 etwa gleich

Kurve 15 etwa gleich

Kurve 16 anfangs gleich
später flacher

Kurve 17 & 18 anfangs gleich
später viel flacher

Kurve 19 & 20

höher, fällt flacher.

Der Ton hält sich durchgehend erst vom siebten Sieb aufwärts.

Dort liegt der Grundton. In den tieferen Sieben zeigen sich nur Reaktionen auf den Anschlag und auf den Dämpferaufsatz. Auf diesen reagieren auch die Kurven 9-11, 19 und 20. Im gedämpften Teil sind die Kurven 14 und 15 besonders flach.

2.522 Die Abbildung 23 von a (220 Hz) entspricht der Abbildung 11 von A,, (27,5 Hz). Die Blockadehöhe der Taste wurde also so gewählt, dass der Ton für subjektive Beobachtung nach zwei Sekunden endete. Die Siebe 1-6 zeigen ähnliche Kurven wie die der Abbildung 22, nur fehlen verständlicherweise die Reaktionen auf den Dämpferaufsatz am Ende. Die Kurven 6-8 sind nunmehr einteilig und hängen stark durch. Das tun auch die Kurven 9 und 10, die übrigens die typische Dämpferaufsatzreaktion von Abbildung 22 zeigen, diesmal aber ganz am Anfang. Für den subjektiven Eindruck, dass der Ton zu ende sei, waren offensichtlich die Kurven 12 und 16 verantwortlich. Die Kurven 14, 15, 17 und 18 fallen erstaunlich flach ab, auch nachdem der Ton schon zu ende ist.

Die Abbildung 24 entspricht der Abbildung 14. Das Pedal ist während der Aufnahme völlig durchgetreten. Die Blockade wird zwei Sekunden nach dem Anschlag plötzlich aufgehoben. Es fällt auf, wie stark die untersten Siebe einbezogen sind, vor allem bei der Dämpferaufsatzreaktion. Bei den Kurven 10 und 11 ist diese Reaktion wieder am Ende des Tones zu sehen. Augenfällig ist auch der Energiependelverkehr zwischen den einzelnen Sieben. Während Kurve 12 verliert, gewinnt Kurve 18 und 20. Danach gewinnt Kurve 12 wieder auf Kosten von Kurve 7, 8, 10 und 11. Inzwischen gewinnen die Kurven 15, 16, 18 und 20. Dann erholen sich die Kurven 10 und 11 während 13

und 14 verlieren usw. . Nach dem Dämpferaufsatz kommen nicht gleich zur Ruhe die Siebe 7, 10, 11, 15 und 16.

Die Abbildung 25 zeigt noch einmal den Ton a (220 Hz), diesmal über das Dämpferpedal gedämpft und nach zwei Sekunden durch ruckartiges freigeben des Pedals beendet. Bei den Kurven 10 und 11 stehen wieder deutlich Dämpferaufsatzreaktionen am Anfang des Tones. Die Kurven 7 und 8 beherrschen gänzlich das Bild, während vor allem die höheren Kurven stark unterdrückt werden.

2.53 Vier Aufnahmen von a" (880 Hz) folgen zum Abschluss. Die Aufnahmebedingungen bei Abbildung 26 sind die gleichen wie bei Abbildung 16 : das Pedal wird vom Gerät B so blockiert, dass der Ton zwei Sekunden nach dem Anschlag endet. Wie bei Abbildung 16 zeigen die unteren Siebe heftige Reaktionen beim Abschluss des Tones. Die Siebe 8, 13 und 14 sind die einzigen, die während der ganzen Dauer des Klanges Werte anzeigen. Im Sieb 8 beziehen sich diese Werte auf eine subharmonische Schwingung, denn die Frequenz des Grundtones von a" liegt mit 880 Hz im dreizehnten und vierzehnten Sieb. Höhere Schwingungen mit auffällig flachen Abfällen sind hier nicht zu beobachten.

Bei der Abbildung 27 ist das allerdings der Fall, und zwar in den Sieben 16 und 17, wo der erste Oberton von a" mit einer Frequenz von 1760 Hz liegt. Bei dieser Aufnahme waren die Bedingungen dieselben wie bei den Aufnahmen zu den Abbildungen 14 und 24. Das Pedal war völlig durchgetreten und zwei Sekunden nach dem Anschlag in die Ruhelage entlassen worden. Auffällig ist hier die intensive Beteiligung der unteren Siebe.

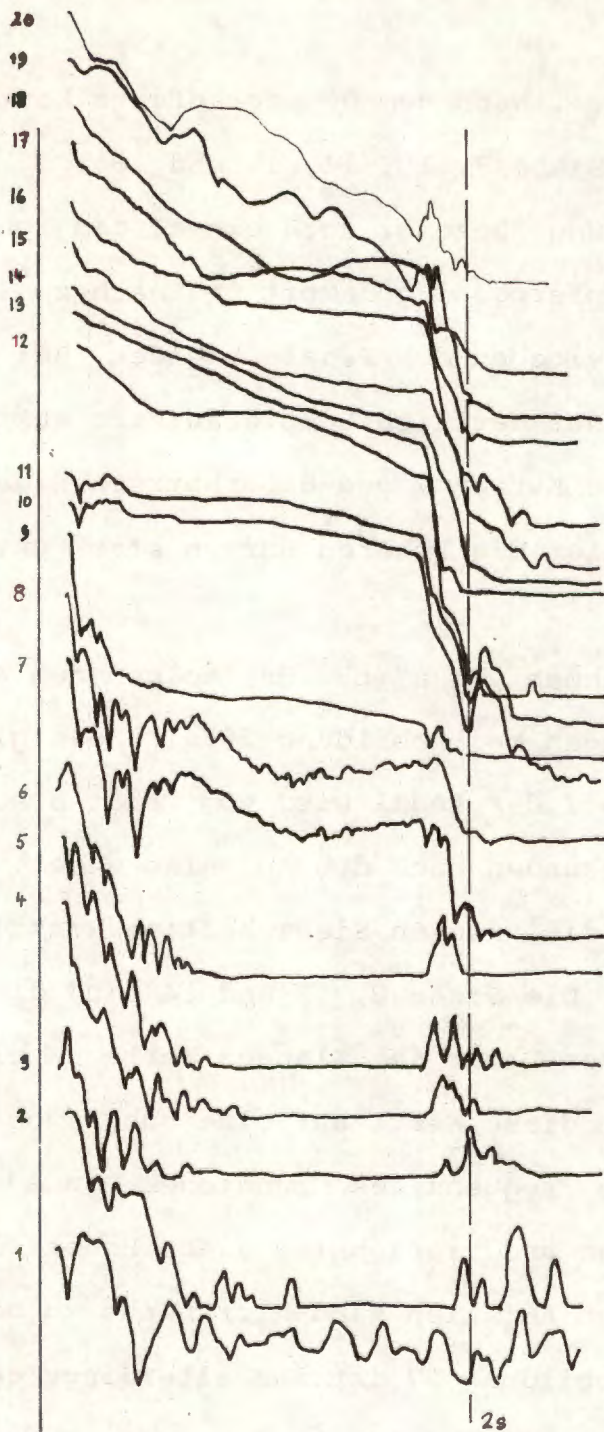


Abbildung 22

a (220 Hz) verklingt bei durchgedrückter Taste. Nach zwei Sekunden schnellst die Taste in die Ruhelage zurück. Das Dämpferpedal wurde nicht betätigt.

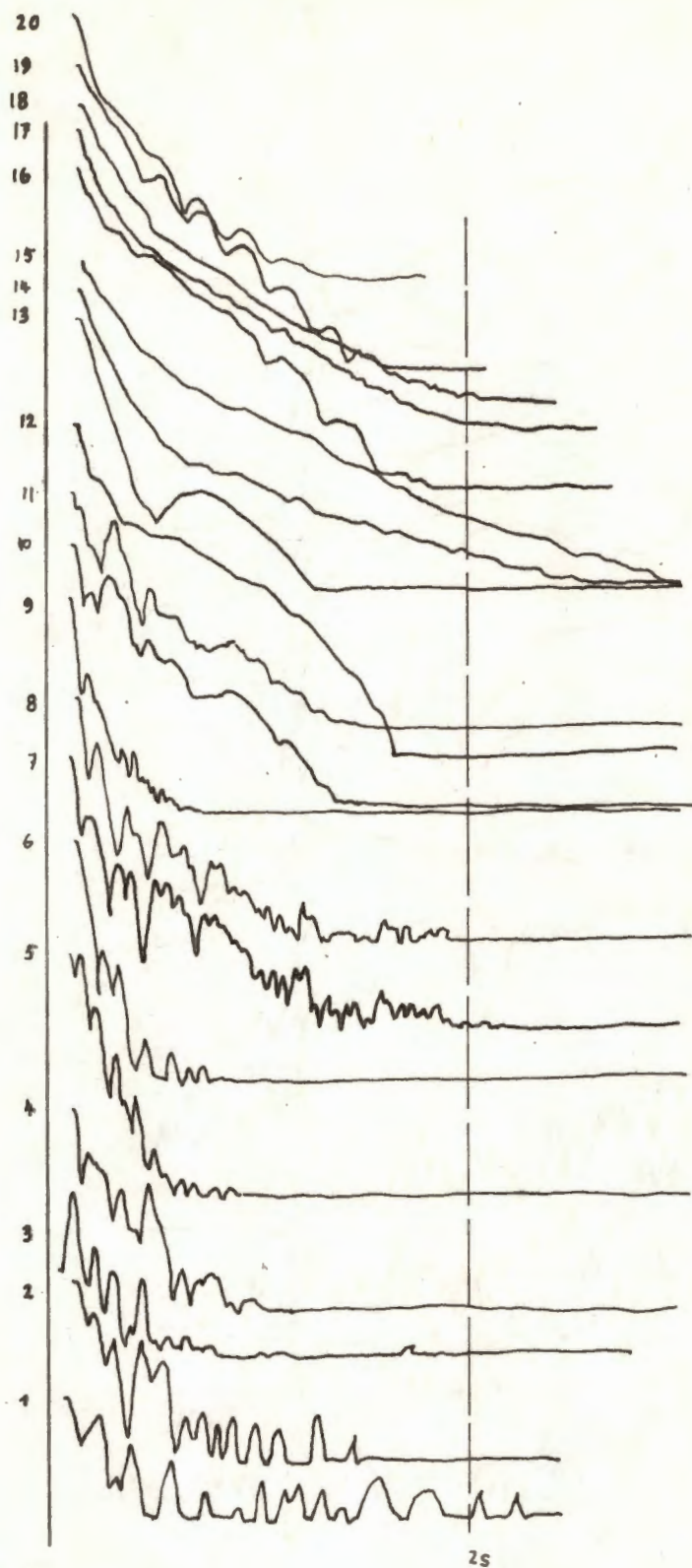


Abbildung 23

a (220 Hz) gedämpft. Die Blockadehöhe der Taste ist so gewählt, dass der Ton für subjektive Beobachtung nach zwei Sekunden endet. Das Dämpferpedal wurde nicht betätigt.

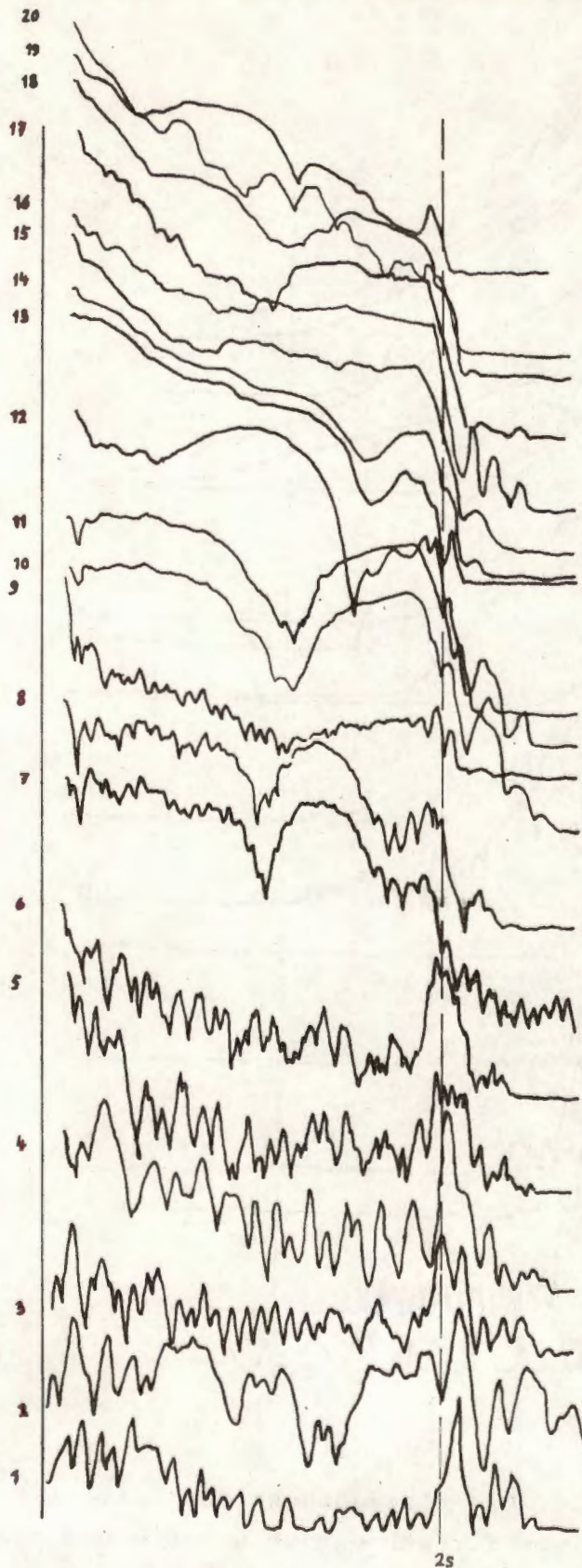


Abbildung 24

a (220 Hz) verklingt bei durchgedrücktem Pedal. Zwei Sekunden nach dem Anschlag schnellt das Dämpferpedal in die Ruhelage zurück.

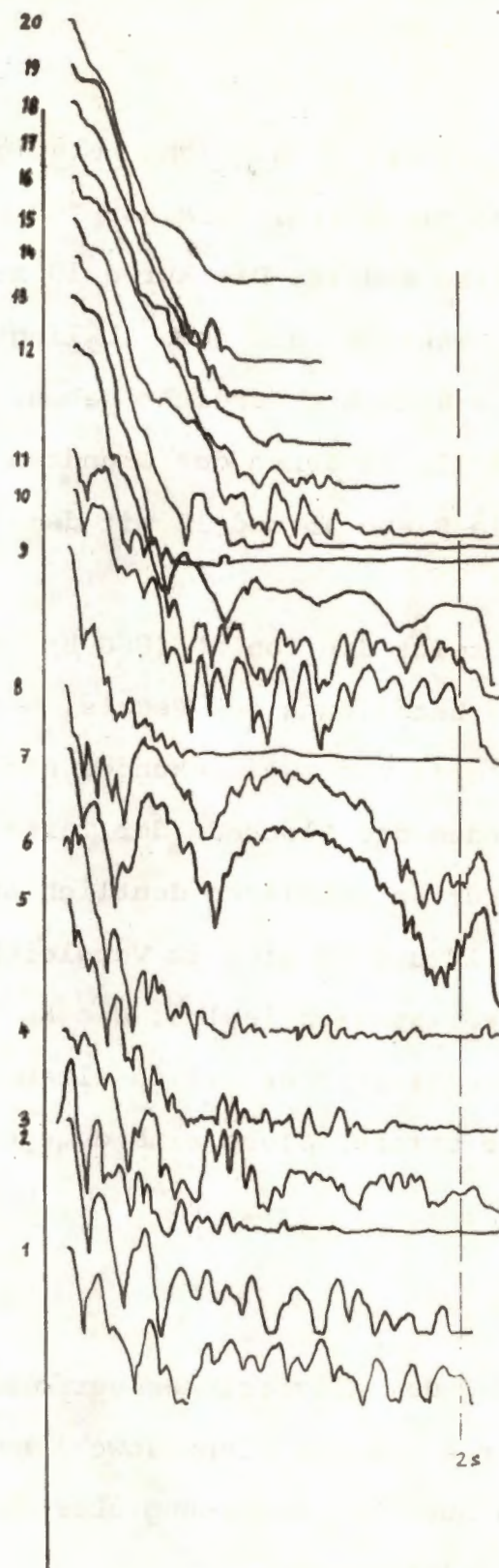


Abbildung 25

a (220 Hz) vom Pedal leicht gedämpft und zwei Sekunden nach dem Anschlag vollends beendet.

Bei Abbildung 28 ist das Pedal nicht betätigt worden. Die Taste wurde hier so blockiert, dass der Ton nach etwa 1,6 Sekunden nach dem Anschlag endete. Die Kurve 18 zeigt hier eine heftige Dämpferaufsatzreaktion, die noch abklingt, nachdem andere Kurven längst die Ruheebene erreicht haben. In Vergleich zu den Sieben 14 und 15, in denen der Grundton vertreten ist, klingen auch die Siebe 16 und 17 mit dem ersten Oberton länger nach.

Die Abbildung 29 zeigt den Ton a" (880 Hz) ein letztes mal, ebenfalls ohne Betätigung des Pedals. Der Ton ist mit dem Gerät A leicht gedämpft und zwei Sekunden nach dem Anschlag beendet worden, indem die Blockade der Taste aufgehoben wurde. Verschiedene Kurven reagieren deutlich auf den Dämpferaufsatz. Die Kurven 12 und 15 sind im Vergleich zu denen der Abbildungen 27 und 28 erstaunlich leblos. Die Kurven 18-20 erscheinen lebhafter und energiereicher als in allen anderen Aufnahmen dieses Tones. Die unteren Siebe sind dagegen sehr ruhig.

2.54 Der Befund

In der gewählten Darstellung des Klaviertones verformt der Dämpfer die Pegelkurven der einzelnen Siebe sowohl bei Bedienung über die Taste als auch bei Bedienung über das Dämpferpedal. Allgemein zeigt sich folgendes:

- I Die Intensität wird von Kurve zu Kurve unterschiedlich gesenkt.
- II Der Abfall wird bei manchen Kurven abschnittsweise, bei anderen durchgehend steiler.

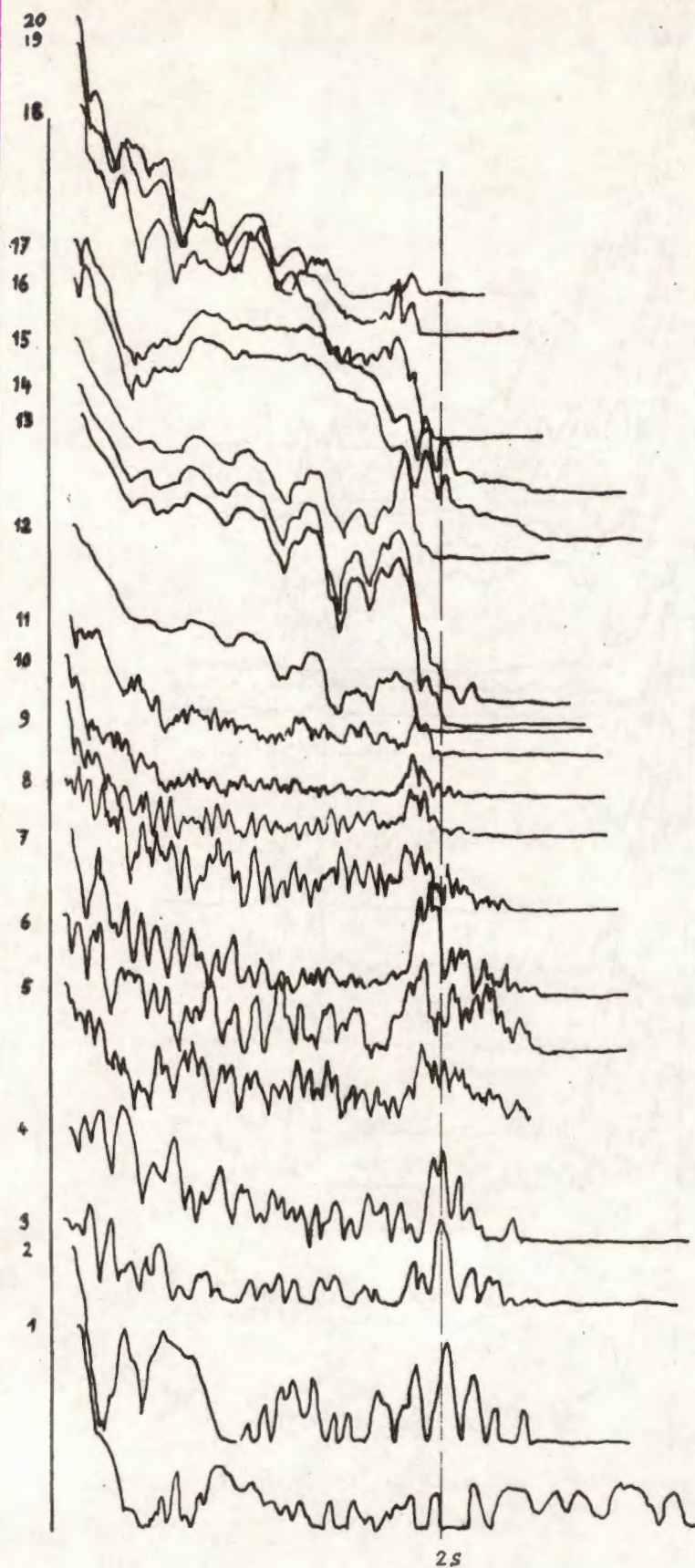
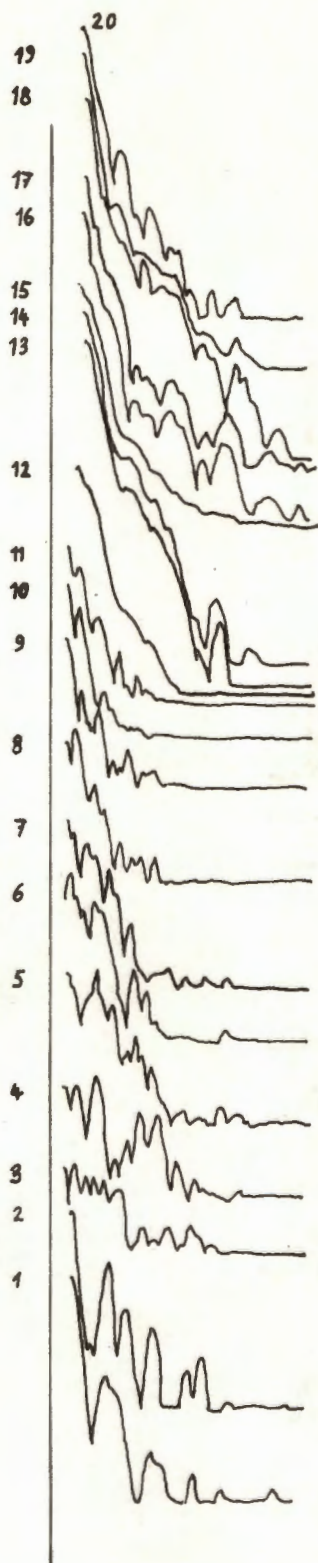


Abbildung 27

a" (880 Hz) mit durchgetretenem Pedal. Zwei Sekunden nach dem Anschlag wird das Pedal in die Ruhelage entlassen.



75

2s

Abbildung 28

a" (880 Hz) mit Tastenblockade. Der Ton endet nach 1,6 s.
Das Pedal wurde nicht betätigt.

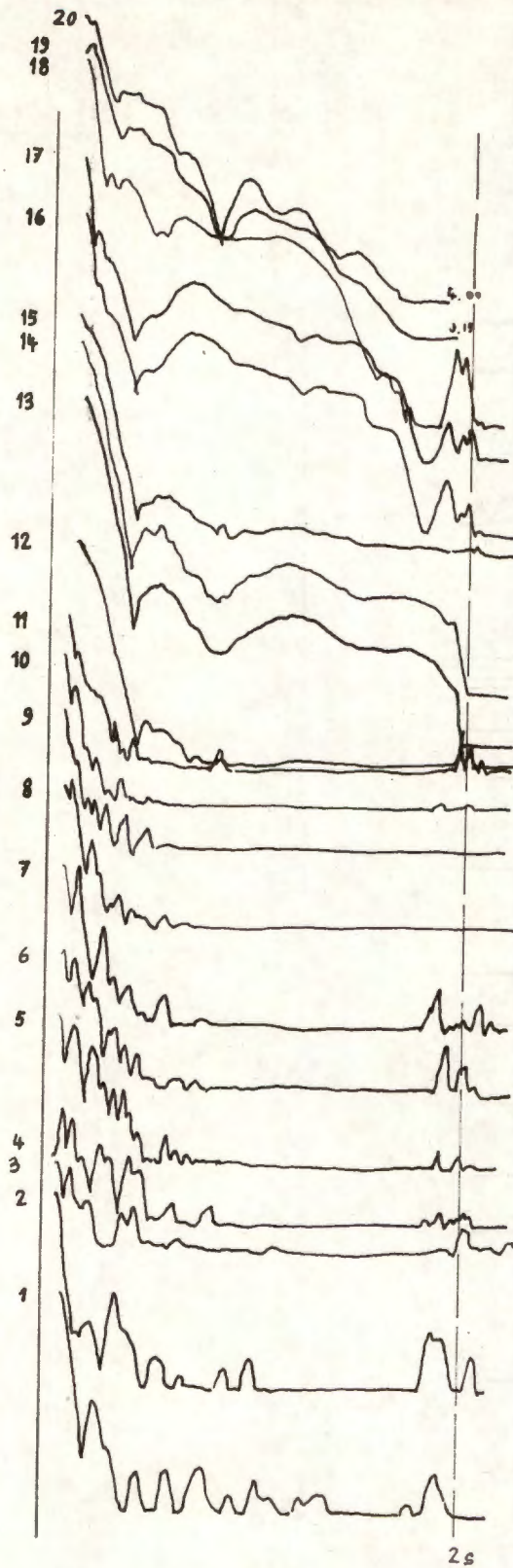


Abbildung 29

a" (880 Hz) mit Tastenblockade leicht gedämpft. Die Taste wurde zwei Sekunden nach dem Anschlag in die Ruhelage entlassen.

- III Die einzelnen Siebe reagieren zum Teil sofort (Dämpfer-aufsatzreaktion), zum Teil verzögert auf den Dämpfer.
- IV Beim ungedämpften und gedämpften Verklingen eines Tones erreichen die Pegelkurven der einzelnen Siebe die Ruheebene nicht gleichzeitig. In den meisten Fällen sind die bis zuletzt aktiven Siebe die gleichen für den ungedämpften und den gedämpften Ton.
- V Bei tieferen Tönen zeigen sich charakteristische Modulationen der Pegelkurven. Bei höheren fehlen diese.

Beim Gebrauch des Dämpferpedals kommt hinzu:

- VI Der Anteil der unteren Siebe wird lebhafter.
- VII Manche Siebe reagieren anders mit Pedaldämpfung als ohne. Der Abfall der Pegelkurven kann dabei steiler oder flacher werden, die Modulation kann wegfallen.

(Eine tiefer gehende Untersuchung und Wertung des Befundes folgt im Zusammenhang mit Befunden zum Klangeindruck in 3.34)

Wegen Befund I ist es nicht möglich, eine Versuchsreihe aufzunehmen, in der in allen Sieben ein gleichmässig zunehmender Abfall vorkommt. Für einzelne Siebe ist das allerdings möglich. Die Abbildung 30 zeigt das Ergebnis einer Versuchsreihe, bei der in einigen Sieben (160, 315, 800, 1000, 1250, 1600 Hz) die Kurven sehr anschaulich gefächert sind. Der Grundton ist hier A,, (27,5 Hz). Die Abbildung 31 zeigt eine ähnliche Reihe für g (196 Hz). Dabei sind die Siebe 315, 400, 500, 630, 800 und 2000 Hz beispielhaft. Der Papiervorlauf des Pegelschreibers ist bei diesen Aufnahmen sehr langsam (3 mm/s), der beobachtete Zeitraum ist daher relativ gross.

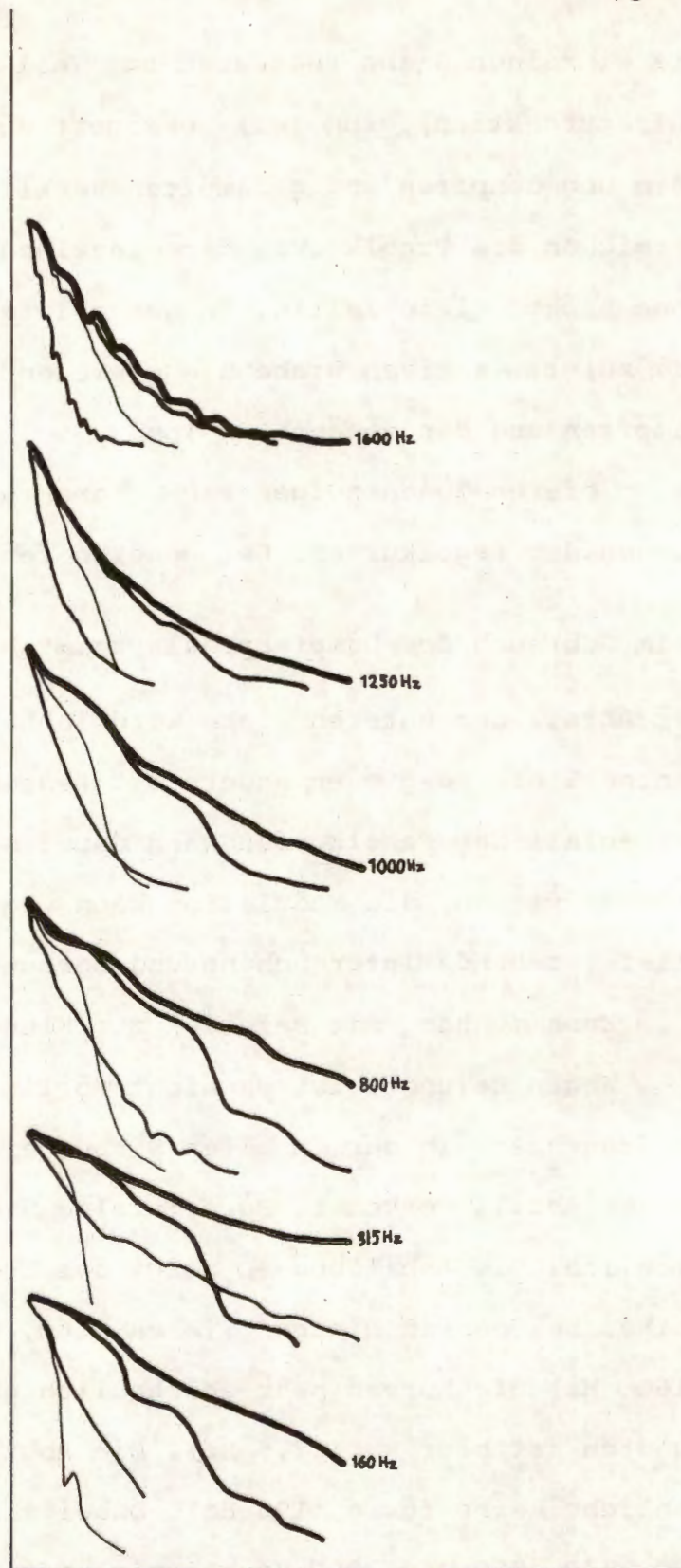


Abbildung 30

A,, (27,5 Hz) verschieden stark gedämpft. In den Sieben 160, 315, 800, 1000, 1250 und 1600 Hz liegen die Kurven fächerförmig.

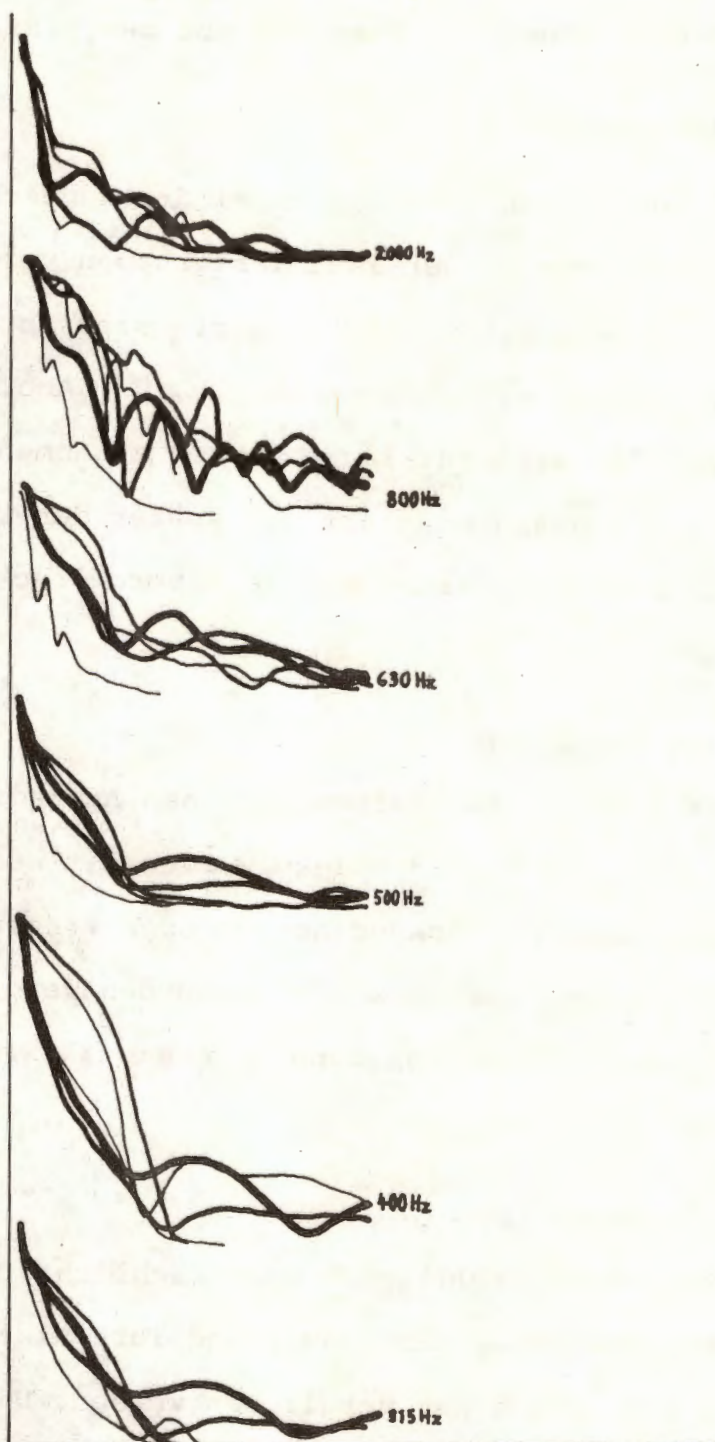


Abbildung 31

g (196 Hz) verschieden stark gedämpft. In den Sieben 315, 400, 500, 630, 800, 2000 Hz liegen die Kurven fächerförmig.

3.00 Der Einfluss der Dämpfung auf den Klangeindruck.

Gruppentest I

Der Schritt vom Klangbild zum Klangeindruck geschah experimentel. Vier Prüfklänge wurden zwei Testgruppen vorgespielt. Die Prüfklänge, im Test Q, R, S, T genannt, sind in den Abbildungen 26-29 dargestellt. (Q = Abb. 29, R = Abb. 28, S = Abb. 26, T = Abb. 27). Die Prüfklänge wurden zusammen mit 25 Testfragen auf ein Tonband montiert und später den Testgruppen vorgespielt. Die Antworten wurden auf vorgedruckten Fragebogen eingereicht.

3.01 Das Testband.

Das Testband bestand aus aufgesprochenen Ankündigungen und Testfragen und Prüfklangen. Diese wurden mit Weissband so eingeklebt, dass zwischen Ankündigungen oder Fragen und dem folgenden Prüfklang zwei bis drei Sekunden vergingen. Auch nach den Prüfklangen gab es dann noch einmal Erholungspausen dieser Länge.

Das Band lautete:

Zwei Klänge unterscheiden sich hauptsächlich durch ihre Tonhöhe, ihre Lautstärke, ihre Dauer und ihre Klangfarbe. Zwei Klänge Q und R sollen nun verglichen werden. Hier ist Q. Hier ist R. Zu jeder folgenden Frage wird Q und R jeweils einmal gespielt werden. Frage eins : unterscheidet sich Q von R in der Tonhöhe? Frage zwei : unterscheidet sich Q von R in der Lautstärke? Frage drei : unterscheidet sich Q von R in der Dauer? Frage vier : unterscheidet sich Q von R in der Klangfarbe? Frage fünf : gibt es irgend einen anderen Unterschied?

Die beiden Klänge werden nun in Gruppen von je drei Klängen gespielt. Bezeichnen Sie bitte den jeweiligen Klang, indem Sie einen Strich durch den vorgesehenen Buchstaben ziehen. Die Beispiele eins und zwei auf dem Testformular 1 zeigen, wie eine bezeichnete Gruppe aussehen soll. Bitte denken Sie daran, dass der Klang, der gerade gespielt wird, durchgestrichen werden soll. Achtung, hier kommt die erste Gruppe (ebenso die zweite, dritte, vierte und fünfte Gruppe).

Nun sollen die Klänge S und T verglichen werden. Hier ist S. Hier ist T. Zu jeder folgenden Frage wird S und T jeweils einmal gespielt werden. Frage elf : unterscheiden sich S und T durch ihre Tonhöhe? Frage zwölf : unterscheiden sich S und T durch ihre Lautstärke? Frage dreizehn : unterscheiden sich S und T durch ihre Dauer? Frage vierzehn: unterscheiden sich S und T durch ihre Klangfarbe? Frage fünfzehn: besteht irgend ein anderer Unterschied?

Die beiden Klänge werden nun in Gruppen von je drei Klängen gespielt. Bezeichnen Sie bitte den jeweiligen Klang, indem Sie einen Strich durch den auf Formular II vorgesehenen Buchstaben ziehen. Vergessen Sie nicht, dass Sie den Klang, der gerade gespielt wird, durchstreichen sollen. Achtung, hier kommt die erste Gruppe (ebenso die zweite, dritte, vierte und fünfte Gruppe).

Nun sollen die vier Klänge Q, R, S, T mit einander verglichen werden. In alphabetischer Reihenfolge klingen sie folgendermassen; die nächsten Klänge sind R und T. Frage einundzwanzig : gibt es irgendeinen Unterschied zwischen R und T? Frage zweiundzwanzig : gibt es irgendeinen Unterschied

zwischen Q und S? Nachdem die Klänge ein letztes mal in alphabetischer Reihenfolge erklingen sind, werden Gruppen von jeweils vier Klängen gespielt werden. Bezeichnen Sie bitte die Klänge, indem Sie den Buchstaben für den gespielten Klang durchstreichen. Hier kommen die vier Klänge zum letzten mal in alphabetischer Reihenfolge. Achtung, hier kommt die erste Gruppe (ebenso zweite und dritte Gruppe).

3.02 Die Testformulare.

Die Testformulare bestanden aus vier Seiten. Auf der ersten wurden Name, Platznummer, Studienrichtung und Studienjahr, bereits bestandene Examina und die Dauer des bislang absolvierten Studiums des ersten, zweiten, dritten und vierten Instruments eingetragen. Diese Seite wurde nicht eigens bezeichnet. Die folgenden Seiten waren mit Testformular 1, beziehungsweise 2 oder 3 überschrieben. Die Antworten waren folgendermassen vorbereitet (siehe Testformular I umseitig):

Testformular 1Abteilung I : die Klänge Q und R

- | | | |
|--|----|------|
| 1. Unterscheiden sie sich durch ihre Tonhöhe? | Ja | Nein |
| 2. Unterscheiden sie sich durch ihre Lautstärke? | Ja | Nein |
| 3. Unterscheiden sie sich durch ihren Zeitwert? | Ja | Nein |
| 4. Unterscheiden sie sich durch ihre Klangfarbe? | Ja | Nein |
| 5. Irgendein sonstiger Unterschied? | Ja | Nein |

Beispiel I	Q	Ø	Ø
	R	R	R

Beispiel II	Q	Q	Q
	R	R	R

- | | | | |
|-----------------|---|---|---|
| 6. Gruppe eins | Q | Q | Q |
| | R | R | R |
| 7. Gruppe zwei | Q | Q | Q |
| | R | R | R |
| 8. Gruppe drei | Q | Q | Q |
| | R | R | R |
| 9. Gruppe vier | Q | Q | Q |
| | R | R | R |
| 10. Gruppe fünf | Q | Q | Q |
| | R | R | R |

Die Testformulare 2 und 3 waren ebenso vorbereitet. Die Versuchspersonen hatten lediglich die passenden Striche zu ziehen.

3.03 Die Testgruppen.

Zwei Testgruppen wurden befragt. Beide Gruppen bestanden aus Musikstudenten. Die Studienstätten der Gruppen lagen weit auseinander. Die Studienjahre waren in den Gruppen wie folgt vertreten:

	Gruppe A	Gruppe B
Erstes Studienjahr :	16	6
Zweites " " :	16	2
Drittes " " :	18	3
Viertes " " :	<u>5</u>	<u>0</u>
	55	11

Über die studierten Instrumente und den damit verbundenen Studienaufwand in Jahren gibt folgende Übersicht Auskunft.

		Gruppe A		Gruppe B	
KLAVIER					
Studienjahre:	10 + 10+	32	58%	8	72%
	5 - 10	19	34%	2	18%
	1 - 5	3	5%	1	9%
	0	1	1%	0	0%
ORGEL					
	5 + 5+	2	3%	0	0%
	2 - 5	7	12%	5	45%
	0 - 2	27	49%	3	27%
	0	19	34%	3	27%

STREICHINSTRUMENTE

5 + 5+	2	3%	0	0%
2 - 5	1	1%	0	0%
0 - 2	6	10%	1	9%
0	46	84%	10	90%

HOLZBLÄSER

2 - 5	4	7%	0	0%
0 - 2	18	32%	1	9%
0	33	60%	10	90%

SOLOGESANG

5 - 5+	1	1%	0	0%
2 - 5	3	5%	1	9%
0 - 2	11	20%	1	9%
0	40	72%	9	81%

CHORGESANG

5 + 5+	16	29%	1	9%
2 - 5	10	18%	0	0%
0 - 2	6	10%	4	36%
0	23	41%	6	54%

Gesang gilt in diesem Zusammenhang als Instrument. Mehr als drei Instrumente studierten nur wenige.

Zahl der studierten

Instrumente

Gruppe A

Gruppe B

1	0	0%	1	9%
2	31	56%	8	72%
3	16	29%	2	18%
4	8	14%	0	0%

3.04 Die Sitzordnung.

Die Gruppe A wurde in demselben Konzertsaal mittlerer Grösse getestet, in dem zuvor einige Versuchsreihen zum Klangbild aufgenommen worden waren, darunter die Töne Q, R, S, T der Abbildungen 26 bis 29. Die Sitzordnung zeigt die Übersicht auf Seite 87.

Darin sind die Stuhlreihen senkrecht und die Sitzplatznummern waagrecht angegeben. Auf dem Sitz ist die Leistung des betreffenden Teilnehmers eingetragen. Die Durchschnittsleistung jeder Reihe steht links von dem Buchstaben, der die Reihe bezeichnet. Die eingetragene Leistung bezieht sich auf die richtigen von 42 möglichen Antworten im Test.

Eine Abhängigkeit der Leistungen von der Sitzordnung ist nicht nachzuweisen. Die höchsten Leistungen kommen zwar in den ersten beiden Reihen vor, während die niedrigste aus der letzten Reihe stammt. Das scheint aber zufällig so zu sein, denn im Durchschnitt ist die Reihe D die beste. Auch sind die Durchschnitte der Reihen C und D zusammen höher als die von A und B. Ebenso sind die Durchschnitte von D, E und F höher als die von A, B und C. Die Unterschiede sind dabei sehr gering, etwa 1%. Die Leistungen sind also gut verteilt, nur die Reihe G fällt stark ab. Es ist unwahrscheinlich, dass die Entfernung zur Schallquelle das verschuldet. Dafür ist die Leistung auf Sitzplatz 12 mit 36 Punkten zu hoch. Auf Sitzplatz 17 hat jemand gesessen, der aus irgend einem Grunde nicht bei der Sache war. Bei nur zwei Personen in dieser Reihe ergibt sich dadurch der besonders niedrige Durchschnitt. Die zweitniedrigste Leistung liefert Reihe F (Pl. 21), die drittniedrigste

Übersicht: Die Sitzordnung der Gruppe A und die Durchschnittsleistungen pro Reihe

Schnitt pro Reihe	Reihe	Platznr.																		
		I	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
	H	Leistung																		
25,0	G			36					14											
33,7	F		36	29	36		39	35	29	36	38	38	20	35						
33,4	E		37	36	32	28	31	36	38	35	39		30	31	28					
36,7	D											39	38	34	36					
33,2	C				21	34	35	36	35	37	35					37	29			
34,9	B			25	37	32	32		35		39	41	37	39	32					
34,2	A						36	30	35	33	35	31							40	

Reihe C (Pl. 13). Diese Leistung hat den Wert 21, genau 50% van den 42 Antworten waren richtig. 50% heisst hier, dass die Versuchsperson geraten hat. Der Durchschnitt aller Reihen zusammen ist 33,7, derselbe Wert, den auch die Reihe F aufweist.

Die Übersicht zeigt, dass die Versuchspersonen nicht von einander abschrieben. Es gibt nur zwei Fälle gleicher Werte bei Nachbarn (F 19 & 20, B 14 & 15). Die Plätze 17 der Reihen A, B, C sind ebenfalls gleichwertig; dass sich die Betreffenden über die Schulter verständigten, ist jedoch unwahrscheinlich. Das wäre sehr mühsam gewesen und bedingte gründliche gegenseitige Absprache, wofür unter den Testumständen keine Zeit verfügbar war.

Auch bei Gruppe B liess sich kein Einfluss der Sitzordnung auf die Ergebnisse nachweisen. Diese Gruppe legte den Test in einem Studie mittlerer Zimmergrösse in drei Sitzungen zu drei, sechs und zwei Teilnehmern ab. Man sass wie folgt:

erste Sitzung : A F K

zweite Sitzung : A F M R T W

dritte Sitzung : A K

Abschreiben war bei dieser Sitzordnung ausgeschlossen. Die Plätze waren folgendermassen im Studio verteilt:

P	Q	R	S	
		30		
		K	L	M O
		36		34
		28		
T	U	V	W	
30			27	
		F	G	H I
		22		
		33		
		A	B	C D E
		28		
		18		
		30		

Bei so wenigen Teilnehmern ist es sinnlos, Reihendurchschnitte zu ermitteln. Ohnehin dürften in einem Raum dieser Grösse Abstandsunterschiede von der Schallquelle keine Rolle spielen, solange man keine der Versuchspersonen unmittelbar an der Schallquelle mithören lässt, wofür gesorgt war.

3.05 Die Wiedergabe.

Die Wiedergabe des Testbandes erfolgte bei Gruppe A über zwei Lautsprechergruppen handelsüblicher Qualität. Die abgestrahlte Leistung wurde nicht gemessen sondern subjektiv eingestellt. Das Ziel dabei war, die Leistung des auf demselben Podium befindlichen Flügels zu simulieren.

Bei Gruppe B erfolgte die Wiedergabe über das Lautsprechersystem eines Plattenspielers bei Zimmerlautstärke. Der Grundgedanke bei der verhältnismässig anspruchslosen Wiedergabe des Testbandes war, dass die Hörer über die Klänge unter allgemein üblichen Bedingungen entscheiden sollten. Klangunterschiede, die unter diesen Umständen unhörbar bleiben, können für musikalisch praktische Erwägungen vernachlässigt

werden. Für die vorliegende Untersuchung wären sie daher belanglos.

3.06 Fehlerquellen.

Nicht alle Fragen wurden beantwortet und nicht alle Antworten waren richtig. Hier sollen nur solche Fehler erörtert werden, die ihren Grund nicht im Hörvermögen der Versuchspersonen haben.

1.) Anlaufzeit.

In manchen Fällen wurden die ersten Fragen nicht beantwortet, offenbar weil sich der Hörer erst an die Testsituation gewöhnen musste. Bei Gruppe A gehören 79% der fehlenden Striche (1,2% Striche wurden nicht gezogen) zur ersten Seite, bei Gruppe B 100%. Anlaufzeitfehler gibt es auf dem ersten und dritten Testformular. Auf dem zweiten nicht, da die Aufgabe dort nicht neu war. In zwölf Fällen wurde das zweite Formular fehlerlos bewältigt, während beim ersten nur 50 bis 60% der Striche eingezeichnet wurden.

2.) Konzentrationsverlust.

Beim dritten Formular, wo vier Klänge auseinander gehalten werden mussten, gab es sieben Fälle von Konzentrationsverlust. Die Hörer erkannten und bezeichneten zunächst die Klänge fehlerfrei. Allmählich verwirrten sich dann aber die Eindrücke.

3.) Nachträgliche Änderung.

Einige Hörer legten sich offenbar während des Tests ihre eignen Theorien über das Angebotene zurecht und änderten nachträglich ihren Befund.

4.) Optische Ablenkung.

Bei einigen Hörern zeigten sich geometrische Leitvorstellungen. Ohne Rücksicht auf das akustische Geschehen wurden geometrische Muster auf dem Testformular angekreuzt, wie zum Beispiel :

§	§	§	Ø	Q	Q / Q
T	T	T	R	⌘	R R
S	S	S	S	S	§ S
T	T	T	T	T	T T
§	§	§			
T	T	T			

3.10 Die Auswertung der Antworten.

Der Test bestand aus 42 Fragen, die richtig oder falsch beantwortet werden konnten. Man musste jedesmal zeigen, ob man Klänge unterscheiden und mit Sicherheit wiedererkennen konnte. Die Aufgabe bestand in der Identifizierung der Klänge. Deswegen seien die 42 Fragen I - Fragen genannt. Die restlichen Fragen beantwortete man, indem man sich für oder gegen einen Grund für die Unterscheidbarkeit der Klänge entschied. Deswegen seien diese Fragen E - Fragen genannt. Die E - Fragen können im Zusammenhang dieser Untersuchung nicht richtig oder falsch beantwortet werden.

Die Auswertung geschah daher in zwei Schritten. Zunächst wurde festgestellt, welche Leistungen bei der Beantwortung der I - Fragen anfielen. Aus den Testformularen derer, die I - Fragen mit Sicherheit beantworteten, wurde dann eine Statistik der Antworten auf die E - Fragen ausgearbeitet. Nur diejenigen, die gezeigt hatten, dass sie die unterschiedlichen Klänge tatsächlich auseinanderhalten konnten, sollten angeben,

Abbildung 32

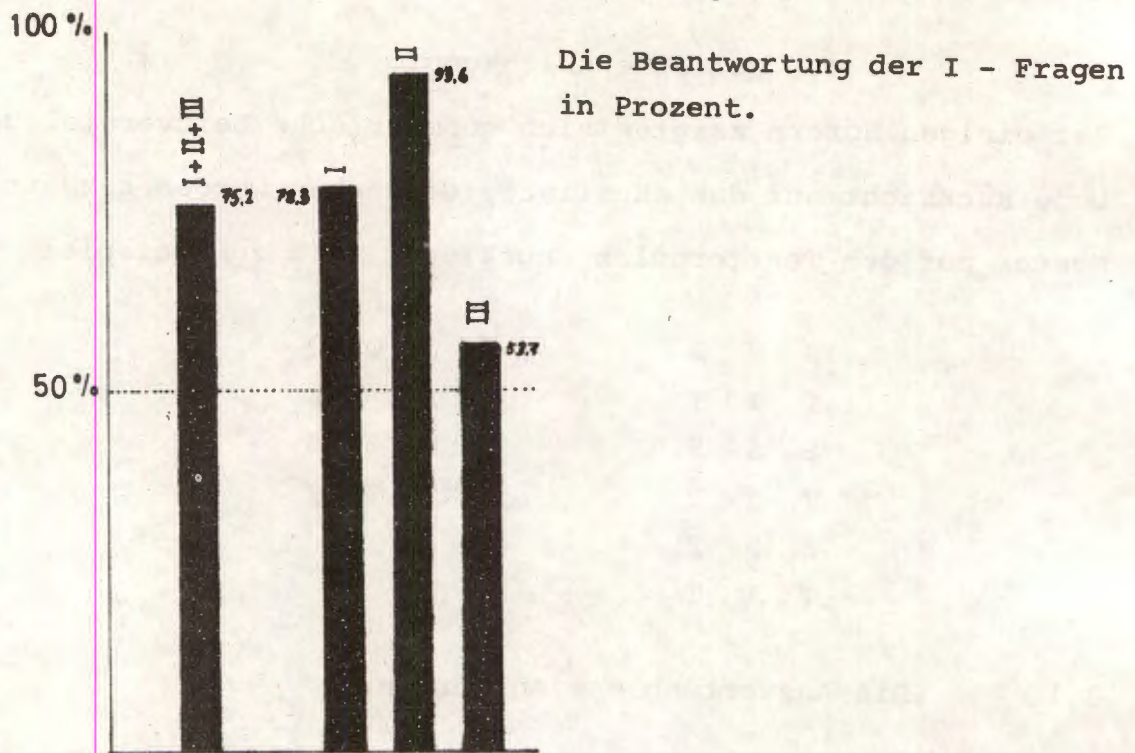
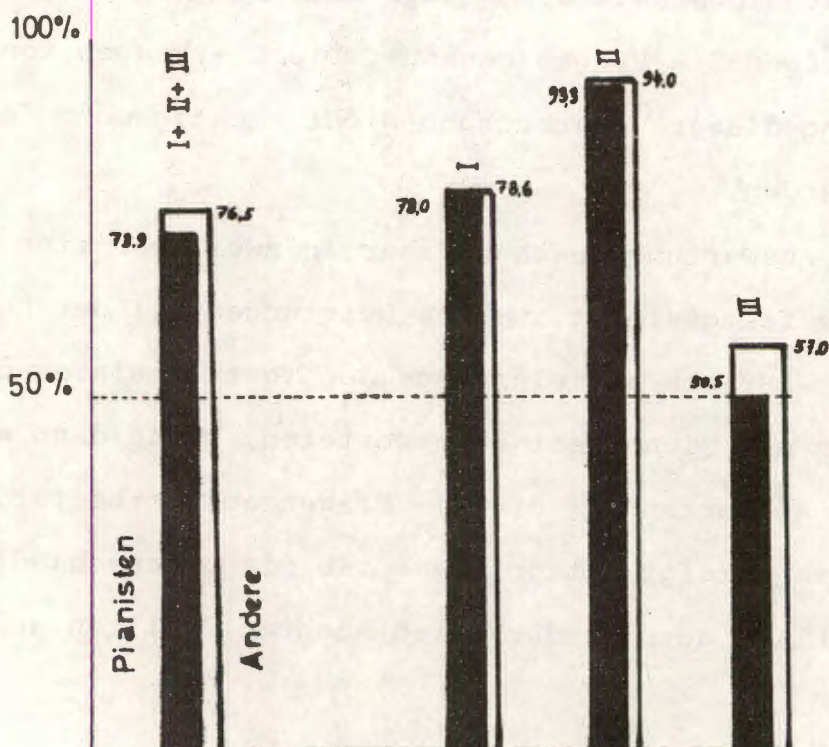


Abbildung 33

Beim dritten Testformular schnitten die Pianisten schwächer als die Studenten anderer Instrumente ab.



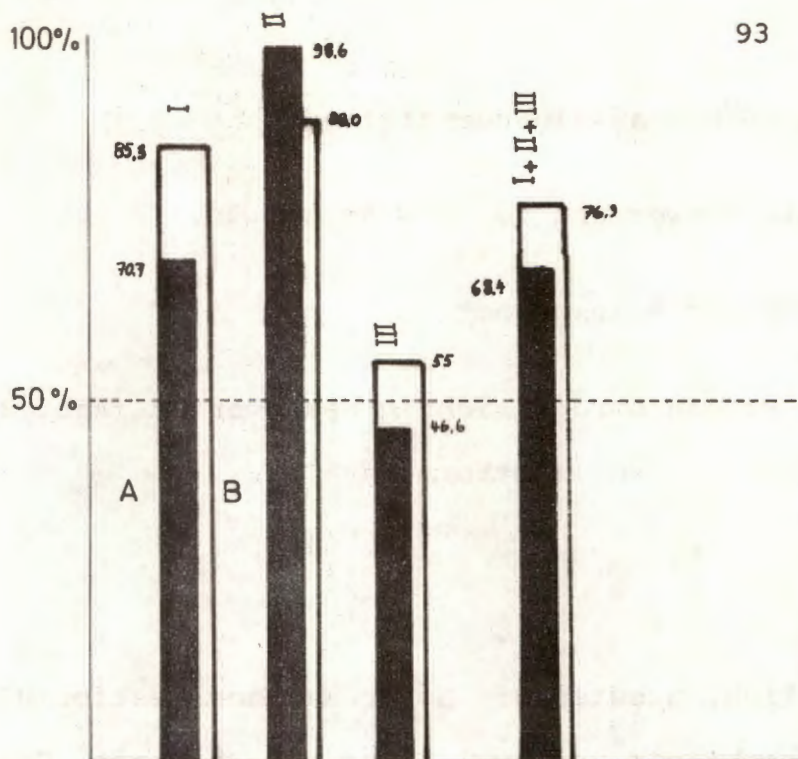
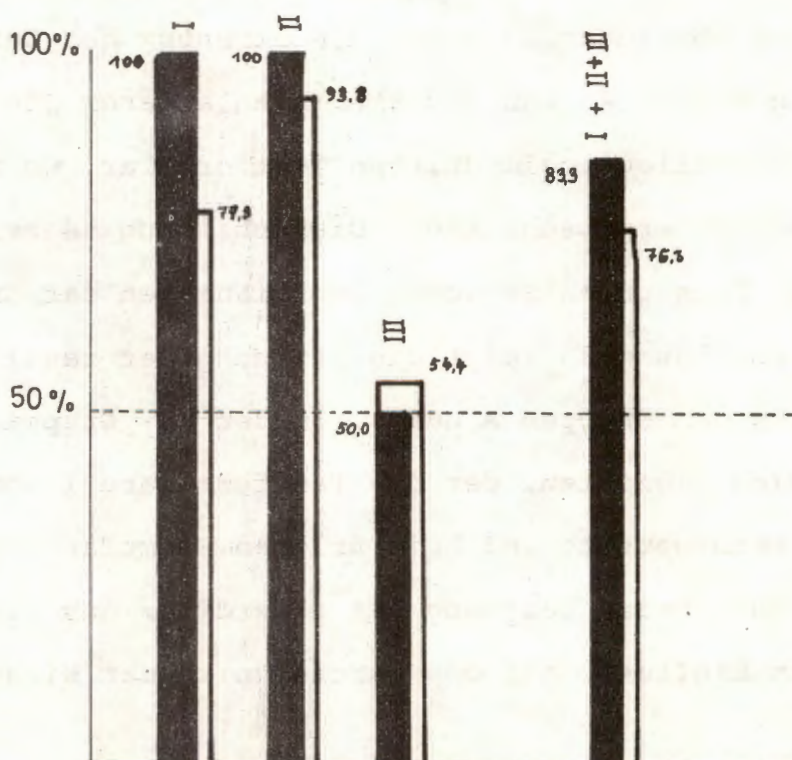


Abbildung 34

Die Leistungen der Pianisten von Gruppe A und B

Abbildung 35

Die Leistungen der restlichen Studenten von Gruppe A und B
(nur ein Vertreter in der B - Gruppe)



wie sie die Klänge auseinanderhielten.

3.11 Die Auswertung der I - Antworten.

Die Gruppen A und B insgesamt.

75,2% aller Fragen wurden richtig beantwortet (Abb. 32)

78,3% " " von Testformular I

93,6% " " " " " II

53,7% " " " " " III

Wie erinnerlich, mussten die Hörer auf den Testformularen I und II den richtigen von zwei Klängen bezeichnen. Das war offenbar leichter als die Bewältigung von Testformular III, wo man den richtigen von vier Klängen andeuten musste. Obwohl es Fälle gibt (9), die mit 80% und besser die Aufgabe lösten, lag die Durchschnittsleistung in der Gegend von 50%. Das heisst hier, dass man der Aufgabe nicht gewachsen war. Das Problem war offenbar nicht die Unterscheidung der Klänge, sondern deren Identifizierung aus dem Gedächtnis.

Die Abbildung 33 zeigt die Streuung der Leistungen zwischen den Pianisten und den Studenten anderer Instrumente. Der Unterschied liegt beim dritten Testformular, wo die Pianisten etwas schwächer abschnitten. Die Abbildung 34 zeigt die Streuung der Leistungen zwischen den Pianisten der Gruppen A und B. Die Abbildung 35 zeigt die Streuung der restlichen Studenten aus den Gruppen A und B. In der B - Gruppe gab es nur einen Nichtpianisten, der die Testformulare I und II fehlerfrei beantwortete und beim dritten Formular die Konzentration verlor. Seine Leistung hat allerdings nur einen sehr bescheidenen Einfluss auf den Durchschnitt der Nichtpianisten.

Erstaunlich ist die geringe Streuung der Durchschnitte zwischen den Gruppen A und B, um so mehr, als die Testbedingungen recht verschieden waren.

Die individuellen Leistungen zeigen folgende Aufteilung: etwa ein sechstel aller Beteiligten blieben unter einer Fehlerrate von 10%. Zweidrittel erreichten 70-90% richtige Antworten. Etwa ein siebtel lagen zwischen 65 und 70% und der Rest (4 Hörer) blieb in der 50% - Gegend.

3.12 Die Auswertung der E - Antworten.

Zunächst wurden die zwölf besten Arbeiten ausgezählt. Für die E - Fragen eins bis fünf zeigte sich :

		E - Fragen				
Anzahl Hörer		1	2	3	4	5
3	L = Ja	O	L	L	L	L
3	O = Nein	O	O	L	L	L
3		O	O	L	L	O
1		O	O	L	O	L
1		O	O	L	O	O
1		L	L	L	O	L
12		1	4	12	9	8
		8,3%	33,3%	100%	75%	66,6%

Bei den E - Fragen elf bis fünfzehn sieht das ähnlich aus:

		E - Fragen				
Anzahl Hörer		11	12	13	14	15
4	L = Ja	L	L	O	L	L
3	O = Nein	O	L	O	L	O
2		O	L	L	L	L
1		L	L	L	L	O
1		L	L	L	L	L
12		6	12	4	12	8
		50%	100%	33,3%	100%	66,6%

Die E - Fragen einundzwanzig und zweiundzwanzig wurden beide hundertprozentig mit Ja beantwortet.

Zur Probe wurden diese Ergebnisse mit einer anderen Auszählung verglichen. Dazu wurden unabhängig von der Gesamtleistung der betreffenden Hörer alle fehlerfreien ersten und alle fehlerfreien zweiten Testformulare herangezogen. Das Ergebnis war folgendes.

		E - Fragen				
Anzahl Hörer		1	2	3	4	5
8	L = Ja	O	O	L	L	O
4	O = Nein	O	L	L	L	L
4		O	O	L	L	L
3		O	L	L	L	O
2		O	O	L	O	L
2		O	O	L	O	O
1		O	L	O	L	L
1		O	O	L	L	----
1		O	L	L	O	O
26		0	9	25	21	11
		0%	34,6%	96,1%	80,3%	42,3%

		E - Fragen				
Anzahl Hörer		11	12	13	14	15
14		O	L	L	L	L
9	L = Ja	O	L	O	L	L
8	O = Nein	O	L	O	L	O
7		O	L	L	L	O
2		L	L	L	L	O
1		L	L	O	O	O
1		O	L	L	O	O
1		O	L	O	O	O
1		O	O	L	O	L
1		L	L	L	L	L
1		L	L	O	L	O
1		L	L	O	L	L
47		6	46	26	44	26
		12,7%	97,8%	55,3%	93,6%	55,3%

Einen anschaulichen Vergleich der beiden Auszählungen zeigt die Abbildung 36. Die stark ausgezogene Kurve gehört zu den Leistungen der zwölf besten Hörer, die andere zeigt die Statistik der fehlerfreien Formulare. Ernst zu nehmende Meinungsunterschiede gibt es nur bei den Fragen 5 und 11. Bei 5 war gefragt, ob es zwischen den Klängen Q und R Unterschiede ausser denen in Tonhöhe, Lautstärke, Dauer und Klangfarbe gäbe. Beide Kurven zeigen Messpunkte in der 50%- Umgebung, die eine oberhalb und die andere unterhalb der Linie. In den besten zwölf Arbeiten wird die gleichlautende Frage 15 mit dem gleichen Prozentsatz über der 50%- Linie beantwortet. Bei den fehlerfreien Formularen entscheidet man sich bei 5 gegen und bei 15 für einen weiteren Unterschied. Allerdings liegen beide Messpunkte sehr nahe an der 50%-Linie. Bei Frage 11 waren die zwölf besten Hörer unentschlossen. Die fehlerfreien Formulare zeigten dagegen eine deutliche Nein- Mehrheit. Die übereinstimmende

Frage 1 wurde von beiden Gruppen fast einstimmig verneint.

Die Frage 13 lautete, ob die Klänge S und T gleichlang seien. Obwohl S (Abb. 26) und T gleicher Dauer waren, zweifelte man hier. Teils wegen des unterschiedlichen Intensitätsabfalles, teils sicher auch, weil die vorherigen beiden Klänge Q und R tatsächlich nicht gleichlang waren.

3.20 Die Auswertung der I- und E- Fragen zusammen zeigt, dass man zwar die ungedämpften und gedämpften Klänge von einander unterscheiden konnte, dass sich aber über die Frage, auf Grund welcher klanglichen Eigenschaften man das machte, keine Einhelligkeit erzielen liess. Die grosse Streuungen der E-Antworten kann damit zusammenhängen, dass diese Fragen mit Ja und Nein beantwortet werden mussten, obwohl damit wenig über den subjektiven Eindruck gesagt werden kann.

So beziehen sich die Fragen eins und elf auf die Tonhöhe. Der erfahrene Hörer weiss sofort, dass dieselbe Taste angeschlagen wird, trotzdem geschieht im zweiten Fall etwas mit der Tonhöhe. In dem Augenblick wo die tieferen Komponenten des Tones herausgedämpft werden, rutscht der Ton subjektiv in die Höhe. Ob man diese Beobachtung mit einem schlichten Ja oder Nein andeuten sollte, hat vor allem die besten Hörer mit Recht zweifeln lassen.

Die Fragen zwei und zwölf beziehen sich auf die Lautstärke. Bei Frage zwölf ist das einfach, denn der ungedämpfte, mit durchgetretenem Pedal gespielte Ton ist tatsächlich lauter. Das Gerät A hat zwar beidemale genau gleich angeschlagen, aber der weitere Verlauf der Pegelkurven zeigt den ungedämpften Ton sofort zwei bis drei dB höher als den ge-

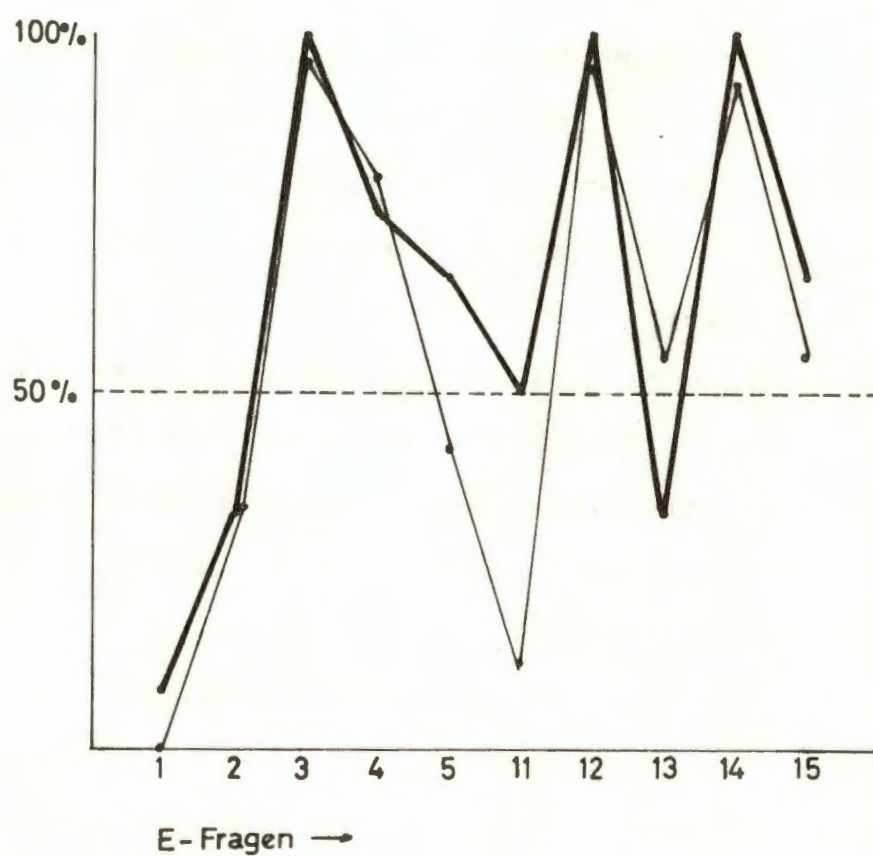


Abbildung 36

Die Streuung zwischen den zwölf besten Arbeiten und den jeweils fehlerfreien Formularen bei der Beantwortung der E - Fragen.

dämpften an. Der Unterschied vergrößert sich dann zunehmend. Subjektiv am auffälligsten ist aber die Abnahme in der Lautstärke, was sich wiederum mit der Auskunft lauter oder leiser beziehungsweise Ja oder Nein nicht ohne weiteres sagen lässt. Daher ist die Tendenz zur 50%-Linie bei Frage 2 völlig berechtigt.

In diesen Zusammenhang gehören auch die Fragen 3 und 13. Der stärker gedämpfte Ton taucht mit seinen unteren Komponenten früher als der ungedämpfte Ton in den Geräuschpegel des Saales ein. Obere Komponenten hört man noch weiterklingen. Was ist nun aber der Ton, sein unterer oder sein oberer Teil? Die damit verbundenen Zweifel deuten sich bei der Beantwortung der Frage 13 durch die Nähe beider Werte zur 50%-Linie an. Bei Frage drei war der Unterschied über jeden Zweifel erhaben.

Die Fragen 4 und 14 beziehen sich auf die Klangfarbe. Für die subjektive Beobachtung ändert sich der Klavierton ständig. Man hört das Auf und Ab der einzelnen Komponenten, obwohl man nicht etwa die einzelnen Pegelkurven hört. Die einzelnen Komponenten werden erst von einem gewissen Pegel aufwärts hörbar. Beim ungedämpften Ton hört man, dass der Klang in seinen oberen Teiltönen endet. Beim gedämpften Klang ist dieses Stadium schneller erreicht und die Veränderung wird somit auffälliger. Daher wurden die Fragen 4 und 14 richtig bejahend beantwortet. Dass man bei Frage 14 seinerseits sicherer war als bei Frage 4, hängt damit zusammen, dass beim Pedalgebrauch mehr tiefere Komponenten beteiligt sind, deren Verschwinden als Folge der Dämpfung eher bemerkt wird, als der Rückgang der weniger Komponenten beim analogen Vorgang ohne

Pedalgebrauch.

Die Antworten zu den Fragen 5 und 15 tendieren wieder zur 50%- Linie. Wie beschrieben, lassen sich die Unterschiede der Prüflänge durch die Antworten auf Fragen nach der Tonhöhe, Lautstärke, Dauer und Farbe allenfalls beantworten. Man war daher berechtigterweise unsicher, ob man noch eine weitere Toneigenschaft verantwortlich halten sollte.

Wieweit das Hörvermögen der Studenten repräsentativ für das musikalische Publikum schlechthin ist, bleibt sicherlich Auffassungssache. Es ist bekannt, dass der junge Mensch einen grösseren Frequenzbereich hört als der ältere. Ausserdem mag das tägliche Studium unter Konkurrenzdruck die Sinne der Jugend wacher halten, als der gelegentliche Konzertbesuch reiferer Jahre das vermag. Doch lehrt die Erfahrung, dass die Aufmerksamkeit des reiferen Menschen umfassender ist und dass eine ständige Bereitschaft zu Einsichten besteht, die dem Studenten erst nach und nach beigebracht werden kann. Es ist jedenfalls angebracht, das Studentenexperiment durch ein anderes zu ergänzen.

3.30 Gruppentest II

Zu diesem Behufe wurde eine Gruppe von Lehrern und Lehrerinnen einer Oberschule befragt. Gleichzeitig konnte ein möglicher, weiterer Einwandt gegen das Studentenexperiment entkräftet werden. Dort waren Aufnahmen vorgespielt worden, bei denen das Mikrophon in unmittelbarer Nähe der Saite gestanden hatte. Der Einwandt wäre, dass der subjektive Eindruck nicht genügend die resonierenden Eigenschaften des ganzen Instruments berück-

sichtigt hätte. Diesemal dem zu entgehen, wurden der Lehrerschaft die Töne Q, R, S und T in drei verschieden grossen Räumen auf drei verschiedenen Instrumenten vorgespielt.

3.311 Die Töne.

Die Töne Q, R, S und T wurden dabei nicht über den Umweg einer Aufnahme und Wiedergabe eines Tonbandgerätes sondern direkt vom Instrument abgegeben. Der Anschlag geschah von Hand. Die Wiederholbarkeit ist unter diesen Umständen gut, denn bei früheren Aufnahmen mit dem Gerät A war festgestellt worden, dass eine Reproduktion eines gegebenen Tones von Hand einem geübten Pianisten tadellos gelingt. Abweichungen bleiben unter einem dB. Der Anschlag von Hand hatte den Vorteil, dass man durch wiederholtes Dämpfen "yowling" und "queer harmonics" vermeiden konnte. Ausserdem konnte dem Hörer eine beliebige Zahl von Wiederholungen in kurzer Folge angeboten werden, so dass innerhalb von fünfzehn bis zwanzig Minuten der Test mit allen Eindrücken frisch im Gedächtnis zu erledigen war. Alles Dinge, die beim Einsatz der Geräte A und B unerreichbar geblieben wären.

Q, R, S und T wurden auf der Taste A_1 (55 Hz) gespielt. Sie waren daher sehr viel tiefer als die Klänge beim Studententest. Im Gegensatz zu diesem standen beim Lehrertest keine dauernd frisch gestimmten Instrumente zur Verfügung. A_1 ist aber die höchste Saite mit einhörigem Bezug. Der Ton wurde daher gewählt, um den Übergang von Instrument zu Instrument nicht durch zufällige Abweichungen in der Stimmung des Bezugs zu erschweren. Subjektiv ist der Unterschied zwischen Tönen der Form Q, R, S und T in der Tiefe etwas leichter zu erkennen

als in der Höhe.

Die Töne wurden nicht zwei Sekunden, wie beim Studententest, sondern fünf Sekunden ausgehalten. Das hatte nichtmusikalische Gründe. Wie erinnerlich waren die Aufnahmen für den Studenten test "trocken", das heisst ohne Raumeinflüsse gemacht worden. Die Wiedergabe erfolgte in Räumen mit Nachhallzeiten unter zwei Sekunden. Beim Lehrertest wurde das Wechselspiel von Instrument und Raum mit einbezogen, und das bei Nachhallzeiten bis zu vier Sekunden. Eine Signaldauer unterhalb der Nachhallzeitwerte hätte den Test sicherlich für manche Hörer erschwert. Ein praktischer Grund kam hinzu. Beim Studententest wurde das Band in einem gesonderten Arbeitsgang hergestellt. Man hatte Zeit zum Experimentieren, bis der gewünschte Inhalt zustande kam. Beim Lehrertest war das anders. Die Töne mussten in Anwesenheit des Hörers produziert werden. Versehen mussten vermieden werden, um die Konzentration des Hörers nicht zu brechen. Nun ist es aber in Abwesenheit eines musikalischen Zusammenhangs recht schwer, Töne der Form Q, R, S und T auf eine Dauer von zwei Sekunden mit einer Toleranz von mehr oder weniger einer Zehntelsekunde zu spielen. Eine grössere Toleranz sollte zur Vorsicht nicht zugelassen werden. Bei fünf Sekunden Dauer ist diese Toleranz leichter zu handhaben und ausserdem für den Hörer etwas weiter unter der Wahrnehmungsschwelle. Nach zwei Proberunden mit Schulkindern passierten im eigentlichen Test dann auch nur zwei Versehen bei rund 600 Anschlägen.

3.312 Die Räume.

Die Testräume gehörten zur betreffenden Schule. Raum eins war

ein Studio der Musikabteilung, Raum zwei war ein kleiner Saal, Raum drei war die Aula. Die Volumina waren :

R_1 ca. 29 m^3

R_2 ca. 510 m^3

R_3 ca. 4000 m^3

Objektive Nachhallzeitmessungen waren nicht verfügbar.

Subjektiv gemessen war die Nachhallzeit bei R_2 mit rund 4 s am längsten. R_3 folgte mit etwa 2,5 s. Am kürzesten war sie in R_1 mit rund 1 s. (Als Schallimpulsquelle dienten zwei Bretter, die gegeneinander geschlagen wurden. Der Impulspegel wurde auf schätzungsweise 45 dB gebracht und die Abklingzeit mit der Stoppuhr gemessen. Die Messwerte wurden danach in Nachhallzeiten umgerechnet.)

Der Geräuschpegel beim Test war hoch im Verhältnis zu Studiotesten. Bei R_1 und R_2 wurde bei geöffneten Fenstern gearbeitet, sodass gelegentliches Vogelzwitschern, Windgeräusche, kommende und gehende Schüler gehört wurden. Flugzeuglärm wurde vorbeigelassen. Der Geräuschpegel bei R_3 war niedriger. Der Saal lag jedoch näher am Strassenverkehr als die anderen Räume. Hin und wieder drang daher das tiefe Gebrumm eines grösseren Fahrzeuges durch. Die Hörer waren offenbar an den herrschenden Geräuschpegel so gewöhnt, dass ihn keiner störend fand.

3.313 Die Instrumente.

Die Instrumente waren :

R_1	Grotrian-Steinweg	Klavier
R_2	Bernhard Steiner	Klavier
R_3	Yamaha	Flügel

Der Flügel war ein verhältnismässig neues Instrument in sehr gutem Zustand auf Konzertniveau. Von den Klavieren war das in R_1 das bessere, immerhin schon reichlich abgespielt und etwas hart im Hammerfilz. Die Mechanik war aber noch sehr gut und die Kontrolle über den Anschlag vollkommen erhalten. Beim Klavier in R_2 traf das nicht mehr ganz zu.

Die Hörer sassen mit dem Rücken zum Instrument etwa 2 m abseits. Das ist ungefähr der Abstand, bei dem sich direkte und indirekte Schalleinfälle am Ohr die Waage halten. Bei R_2 dürfte diese Balance am besten gewesen sein, bei R_1 überwog der indirekte, bei R_3 der direkte Schalleinfall ein wenig.

3.314 Die Hörer.

Getestet wurden dreizehn Lehrkräfte. Dabei waren alle Altersgruppen von den ersten Berufsjahren bis nahe zum Pensionsalter vertreten. Fünf Lehrkräfte gaben Musikunterricht. Eine Lehrkraft erteilte Kunstunterricht. Zwei waren Naturwissenschaftler, der Rest Philologen. Mit einer Ausnahme hatten alle Chorerfahrung. Die meisten spielten mehrere Instrumente nach folgender Verteilung :

Anzahl Instrumente	Anzahl Lehrkräfte
1	2
2	5
3	2
4	3
5	0
6	1

Nach Häufigkeit geordnet waren das : Klavier, Blockflöte, Gitarre, Orgel, Violine, Klarinette, Cembalo. Erfahrung im

Sologesang wurde als Instrument gewertet. Bevorzugte musikalische Werkgruppen waren:

1. Symphonische Musik
2. Chormusik
3. Klaviermusik
4. Opernmusik, Kammermusik.

Bevorzugte Komponisten waren:

1. Beethoven
2. Chopin
3. Mozart, Verdi
4. Liszt, Schumann, Grieg
5. Brahms, Tschaikowsky
6. Bach, Händel, Ravel .

Palestrina, Berlioz, Elgar, Hindemith, Schönberg und Berg wurden je einmal genannt. Ungenannt (aus einer Liste zum ankreuzen) blieben Monteverdi, Donizetti und Bizet.

Dieser Befund war unerwartet, insofern die Lehrkräfte wahllos aus einem Lehrkörper von etwa vierzig Mitgliedern ausgesucht worden waren. Selbstverständlich hatte man bei den Mitgliedern der Musikabteilung einen entsprechenden Bildungsstand erwartet, die musikalische Bildung der "Laien" war jedoch verblüffend. Die Testpersonen vertraten also ein gut gebildetes, anspruchsvolles und sicherlich konservatives Publikum.

3.32 Der Test.

Die Testpersonen wurden einzeln getestet. Man begann in R_1 . Zu allererst füllte man ein Formular ein, aus dem später die eben genannten statistischen Werte zur musikalischen Bildung der Beteiligten gelesen wurden. Danach erhielt man drei Exemplare des eigentlichen Testformulars, für jeden Testraum eines. Das Testformular zeigte vier waagrechte Spalten, vor denen links die Buchstaben Q, R, S und T standen. Über der obersten Spalte stand Tonhöhe, Lautstärke, Dauer, Klangfarbe, sonstige Bechreibungen und Zeichnung in einer Linie. Dem Hörer wurde vor dem Test erklärt, dass er in die Spalten seine Beobachtungen beim Vergleich der einzelnen Töne eintragen sollte. Falls er Anregung benötigte, solle er sich an die als Hinweise gedachten Überschriften der obersten Spalte halten. Zeichnungen seien erwünscht. Es käme im Ganzen darauf an, soviel wie möglich subjektive Beobachtungen beim Vergleich der Töne einzutragen. Dabei könne jeder Ton auf Anfrage beliebig oft wiederholt werden.

In der Tat liessen sich manche Beobachter die Töne bis zu neun mal vorspielen. Den meisten genügten drei bis fünfmal. Eine Lehrerin schrieb nach dem ersten und einzigen mal ihren vollen Befund. Beziehungen zwischen der Häufigkeit der angefragten Wiederholungen und der Genauigkeit der Beobachtung waren nicht festzustellen.

Man begann mit den Tönen S und T. Es folgten Q und R, danach Q und S, schliesslich R und T. Dasselbe wiederholte man unmittelbar anschliessend in den Testräumen R_2 und R_3 . Der Weg zwischen den Testräumen brachte den Beobachtern eine

Entspannung von zwei bis vier Minuten. Man unterhielt sich unterwegs. Beim Test selbst zeigten sich unterschiedliche Haltungen. Bei einigen sah man die Anstrengung gespannter Konzentration, andere zeigten amüsierte Neugier. Allgemein bekannte man hinterher, dass die Höraufgabe leicht sei, schwierig und ungewöhnlich sei nur gewesen, sich über das Gehörte in Worten auszudrücken.

3.33 Die Beobachtungen.

- I. Alle Hörer schrieben über alle Töne in allen Räumen. Obwohl sehr unterschiedliche Eindrücke geäußert wurden, war man sich einig, dass man tatsächlich vier verschiedene Töne hörte.
- II. Dass die Töne Paare bildeten, wurde erkannt. Das geht aus den Zeichnungen hervor. Je einmal wurde eigens notiert, Q und S beziehungsweise R und T seien sich sehr ähnlich. Ein Hörer schreibt: Q = S nur weniger Volumen

$$R = T \quad " \quad " \quad " \quad .$$

Ein weiterer Hörer schreibt: "Nach einiger Zeit wollte es mir vorkommen, als seien Q und S sowohl als R und T identische Klänge".
- III. Vier Hörer vermerkten, Q und S ende plötzlich. "In der Mitte abgebrochen" heisst es einmal, "Klingt unvollendet", ein andermal. Zehn Hörer beobachteten, dass die Töne R und T allmählich "davonfliessen". "T bleibt länger im Raum", "R klingt im Kopfe nach", "T dauert länger, ver-ebbt wogend", "T hat etwas Beschliessendes", heisst es.
- IV. Zwei Hörer beobachteten Obertöne bei R und T.
 H_1 : "Weiter oben ein Oberton; der Klang ist völlig

anders", heisst es zu R. Zu T : "Der Oberton ist deutlicher als bei R".

H₂ : Der Hörer beschreibt die Töne Q und S als "normal". Die Obertöne höben sich nicht ab. Bei R und T seien die Obertöne jedoch - vor allem gegen Ende - deutlich hörbar. Der Hörer hebt in R₂ besonders den dritten Oberton hervor.

- V. Dass R und T nicht gleichmässig sondern stufenweise gedämpft wurden, vermerken vier Beobachter übereinstimmend in R₂. Obwohl dieselbe Technik bei R₁ und R₃ verwendet wurde, fiel das offenbar nicht auf, jedenfalls wurde - mit einer Ausnahme - nichts dergleichen gemeldet.
- VI. In R₁ war eine deutliche Dämpferaufsatzreaktion bei Q und S zu hören. Nur zwei Hörer haben das angedeutet.
- VII. Über T schreibt ein Hörer: "es will vorkommen, als ob der Ton gegen Ende höher wird". Ein weiterer Hörer hört die Töne mit Pedalgerbauch, S und T, regelmässig tiefer als die Töne ohne Pedal, Q und R. Er hört aber auch R höher als Q.

Es gibt noch einen Fall von Tonhöhenunterschieden. Der Beobachter hört in R₁ und R₂ die Töne S und T höher als die pedalfreien Töne Q und R. Die gedämpften Töne R und T hört er tiefer als die ungedämpften. In R₃ fehlt allerdings ein entsprechender Vermerk für R.
- VIII. Für einen Beobachter sind die Töne S und T "dunkler" als R und T, welche ihrerseits beide etwas "falsch" klingen. Ein anderer Beobachter schreibt über R : "der Ton wird heller".
- IX. Für einen Beobachter klingen die Töne Q und S "kälter"

als R und T. Am "wärmsten" klingt R.

- X. Einem Beobachter klingen die Töne R und T in R_2 "blechern".
 - XI. Ein Beobachter schreibt bei R : "die Farbe nimmt ab mit decresc. - wird heller mit decrec", zu T : "allmähliche Farbveränderung mit decresc". Für diesen Hörer klingen R und T "rund".
 - XII. Ein Beobachter hört R und T gedrosselt, wie in Atemnot. S dagegen sei "runder" gewesen.
 - XIII. Für einen Beobachter klingt R und T wie ein "Haufen Töne (Obertöne), der allmählich zu einem Klang wird". Bei T "ist ein Klang länger zu hören".
 - XIV. Sieben Beobachter hörten besser in R_3 . Zwei fanden R_3 allerdings dumpfer und farbloser als R_1 und R_2 . Einem Hörer fielen die Unterschiede zwischen den Tönen in R_1 am meisten auf.
 - XV. Zwei Beobachter, darunter ein Mitglied der Musikabteilung, lieferten Beschreibungen, aus denen sich nicht ablesen lässt, dass sie nennenswerte Unterschiede hörten.
 - XVI. Sieben Beobachter hörten Stärke- und Dauerunterschiede. Zwei in allen Räumen, einer in zwei Räumen, vier in je einem Raum. Auf acht Formularen waren S und T lauter und R und T länger. In drei Fällen war Q und S lauter und R und T länger. Einmal wird nur R länger als Q gehört.
- Für sich genommen ist der zweite Test wegen vieler, subjektiver Faktoren eine nur beschränkt zuverlässige Erkenntnisquelle. Als Ergänzung zu Test I liefert er

jedoch wertvolle Bestätigungen:

- 1.) Die Mehrheit der Beobachter hört Unterschiede zwischen Tönen der Form Q, R, S und T.
- 2.) Bei der Beschreibung der Unterschiede zeigen sich Meinungsverschiedenheiten.
- 3.) Die Wahl der Darbietung (Instrumente, Räume, indirekte und direkte Wiedergabe) spielt eine untergeordnete Rolle.

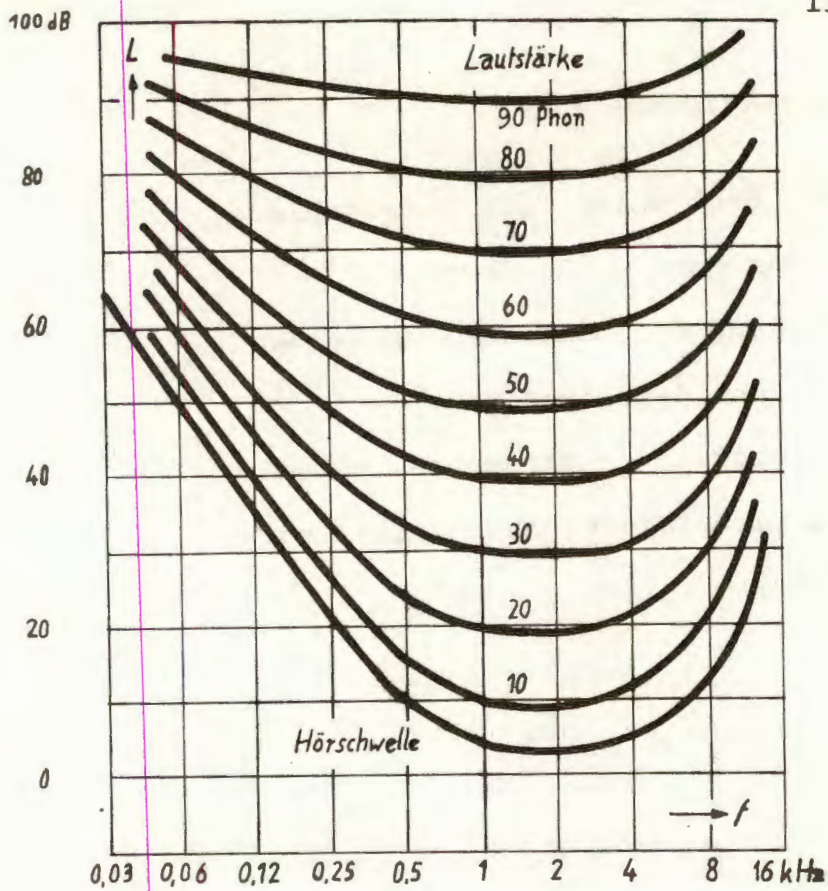


Abbildung 37a

Kurven gleicher Lautstärke

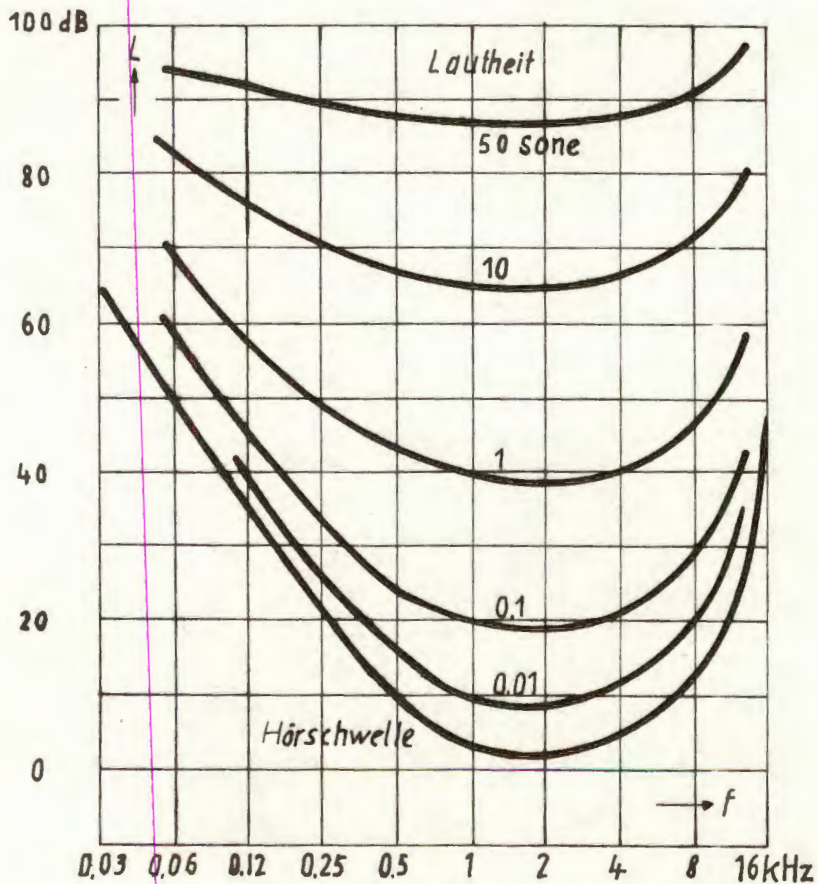


Abbildung 37b. Kurven gleicher Lautheit

3.34 Die Wertung der Befunde

Es soll nun untersucht werden, wieweit sich zwischen den Befunden der einzelnen Experimente (2.54; 3.10-3.20; 3.33) kausale Zusammenhänge aufzeigen lassen. Dabei muss beachtet werden, dass im Bewusstsein des Hörers nur eine verhältnismässig willkürliche Auslese der im Schall enthaltenen Informationen registriert wird. Diese Auslese ist im biologischen Sinne arteigen und gilt mit feststellbaren Streuungen für das menschliche Gehör allgemein. Daher soll nunmehr die Ausbeute dieser Arbeit nach dem Ausleseprogramm des menschlichen Gehörs geordnet und untersucht werden.

3.351 Intensität, Lautstärke, Lautheit.

Was sich im Klangbild übersichtlich als Intensität in dB darstellen lässt, tritt nur einmal, im Frequenzbereich um 1 kHz, entsprechend im Klangeindruck auf. Da eine genaue Entsprechung in anderen Breichen fehlt, hat man zwei Näherungsskalen mit den Einheiten Phon (Abb. 37a) und Son (Abb. 37b) entwickelt. In Phon werde die Kurven gleicher Lautstärke angegeben, die in tieferen und sehr hohen Frequenzbereichen steil schräg zu den Geraden gleicher Intensität (in dB) verlaufen. Nur bei der Frequenz von einem Kiloherz sind Phon und Dezibell (über $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$) wertgleich.

Der Oktaveinteilung im Frequenzbereich entspricht die Sonskala im dynamischen Bereich. Mit dem Schritt von 0,01 bis 0,1 und wiederum von 0,1 bis 1 sone wird jedesmal die Lautheit verdoppelt. Dazwischen liegen mit zunehmender Dynamik zunehmend viele Elementarstufen der Lautheit. Im Bereich von

einem Kiloherz sind das:

Sone	Elementarstufen
0 - 0,01	1
0,01 - 0,1	3
0,1 - 1	10

Der Bezugswert zwischen der Phon- und der Sonskala ist
 1 son = 40 Phon. Man vergleiche nun die Abbildungen 10 und 11.
 Zur Erleichterung sind die hier bedeutenden Werte in den Ab-
 bildungen 38 a - d gesondert dargestellt worden.

38a : M sind die gemeinsamen Anfangswerte der Pegel-
 kurven von Abbildung 10 und 11. Sie sind in dB über $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$
 eingetragen und zur besseren Übersicht zu einem Polygon ver-
 bunden. Die Terzsiebe sind von links nach rechts angeordnet.
 Jeder Messpunkt entspricht einem Sieb. U sind die Pegelwerte
 des ungedämpften Tones von Abb. 10, 30 mm nach dem ersten
 Maximum gemessen. G sind die Pegelwerte des gedämpften Tones
 von Abbildung 11 zum selben Zeitpunkt. U und G sind ebenfalls
 zu Polygonen verbunden. Hs ist eine hypothetische Hörschwelle.
 Hypothetisch deswegen, weil Hörschwellen verschieden ausfallen,
 wenn verschiedene Prüfsignale gleichzeitig oder nacheinander
 angeboten werden. Die Hörschwelle für Terzbereiche eines
 Klaviertones kann deswegen nicht als bekannt vorausgesetzt
 werden. Die hier eingezeichnete Hörschwelle ist einer Arbeit
 über Hörschwellen mit reinen Tönen entnommen¹⁵⁾ und dient
 lediglich zum Vergleichen.

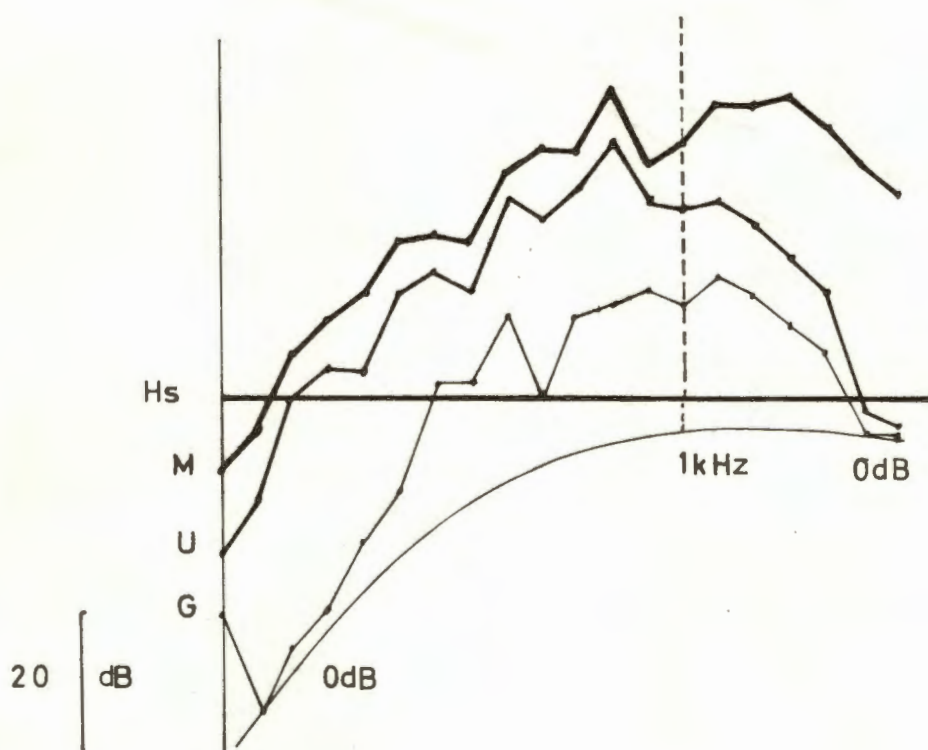
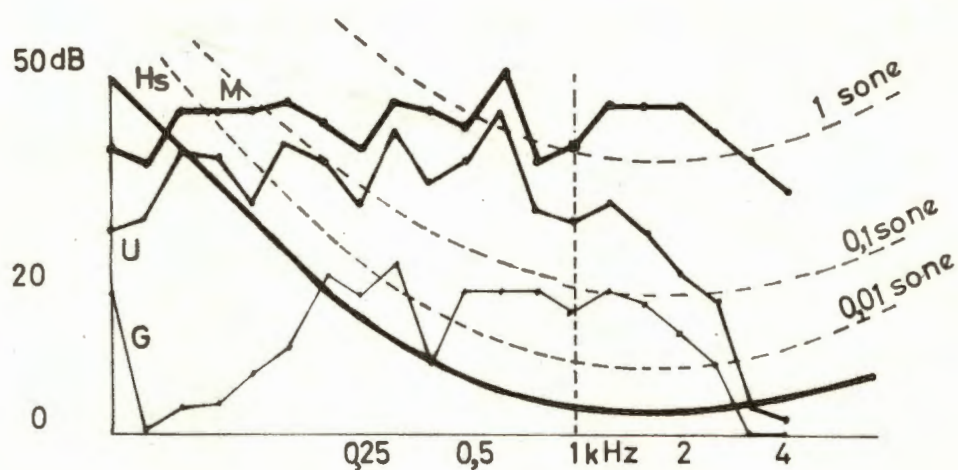


Abbildung 38a (oben) und 38b (unten)

Die Töne U (ungedämpft) und G (gedämpft) ca. 1 s nach dem Anschlag mit dem gemeinsamen Ausgangspegel M, einmal auf 0 dB = $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$ (a) und einmal auf eine hypothetische Hörschwelle bezogen (b).

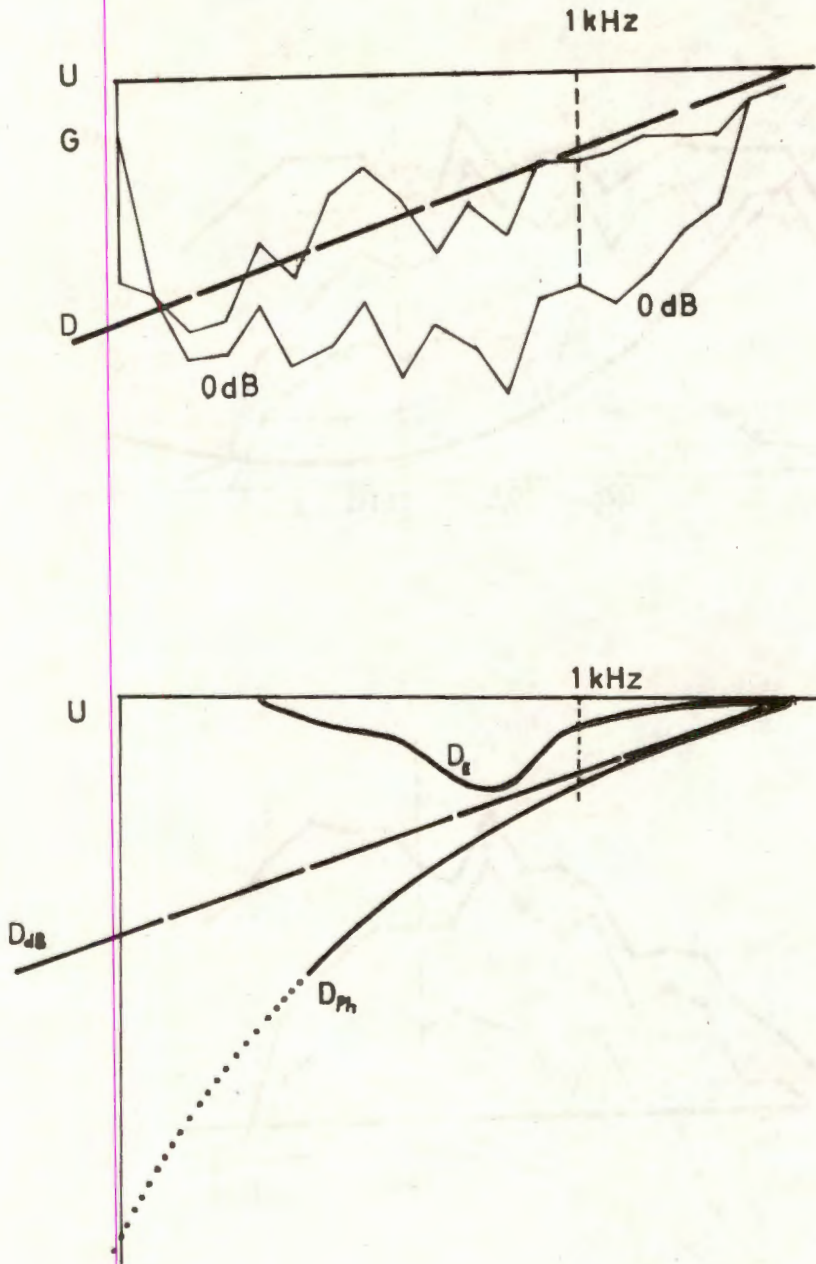


Abbildung 38c (oben) und 38d (unten)

- (c) Das Abstandverhältnis $U - G$ auf U bezogen und zu D idealisiert. (d) D auf U bezogen in dB (D_{dB}), in Phon (D_{ph}) und Elementarstufen der Lautheit (D_E). Zwischen den Größenordnungen der drei Formen von D bestehen keine Beziehungen, lediglich der Verlauf interessiert.

Der Abbildung ist anzusehen, dass

- 1.) unterhalb 1 kHz M und U einander gleichen,
- 2.) oberhalb 1 kHz U und G einander gleichen,
- 3.) G erst bei 200 Hz über der Hörschwelle erscheint.

38b. Zur besseren Übersicht sind dieselben Daten noch einmal dargestellt. Die Werte sind auf H_s bezogen, die als Gerade dargestellt ist. Es lässt sich so leichter vergleichen, wie weit die einzelnen Messpunkte oberhalb und unterhalb der hypothetischen Hörschwelle liegen. Es zeigt sich, dass bei G im Gegensatz zu M und U der höchste Wert oberhalb von 1 kHz auftritt.

38c. Hier ist U als Gerade dargestellt, um den Abstand zwischen U und G anschaulich zu machen. Das Abstandsverhältnis $U - G$ ist zu einer Geraden D idealisiert, deren Anstieg ungefähr 5 dB/Oktave ist. Die einzige Abweichung ist das unterste Sieb.

38d. Das Abstandsverhältnis $U - D$ ist drei mal ausgedrückt, in dB (D_{dB}), in Phon (D_{Ph}) und in Elementarstufen der Lautheit (D_E). D_E zeigt, dass trotz zunehmenden Phonabstandes der subjektive Unterschied zwischen U und G am grössten im Bereich unmittelbar unter 1 kHz zu vermuten ist, relativ grösser noch, als G in 38c erwarten lässt. Weiter frequenzabwärts werden die Unterschiede wieder kleiner, da dort G und U in der Nähe der Hörschwelle bleiben, wo es nur wenige Elementarstufen gibt. Es muss besonders beachtet werden, dass die rund dreizehn Elementarstufen der Lautheit, um die sich D_E von U entfernt, zwei Lautheitsoktaven beinhalten. Bei 1 kHz ist

D_E auf die Hälfte und von da bis zum Minimum noch einmal um die Hälfte seiner Lautheit gesunken.

3.352 Die Verdeckung

Mit Intensität, Lautstärke und Lautheit hängt die sogenannte Verdeckung zusammen. Wird die Intensität zweier Töne, Klänge oder Geräusche zunehmend verstärkt, so tritt bald der Fall ein, dass nur ein Schallereignis wahrgenommen wird. Das hängt damit zusammen, dass im Hörzentrum des Gehirns nicht akustische sondern elektrische Impulse verarbeitet werden. Die elektrischen Impulse sind im Innenohr aus ursprünglich akustischen Stimuli hervorgegangen. Die Amplitude der akustischen Stimuli wird dabei in der Frequenz der elektrischen Impulsfolgen ausgedrückt. Die verfügbaren Nervenzellen haben jedoch eine gewisse Refraktärzeit nach jeder Leistung nötig. Wenn die Verschlüsselung der akustischen Stimuli in elektrische Impulsfolgen höhere Frequenzen fordert, als die Refraktärzeiten der verfügbaren Zellen zulassen, so sorgt eine Schaltung dafür, dass immer mehr umliegende Zellen zur Impulsfolge beitragen. Es entstehen Zonen aktivierter Zellen. Mit zunehmender Intensität der akustischen Stimuli dehnen sich die Zonengrenzen aus, bis die Grenzen benachbarter Zonen einander berühren und schliesslich überlagern. Die Zellen im Überlagerungsgebiet geben aber ihre Impulse nur in einer Richtung ab, nämlich zur bereits breiteren Zone. Der schmaleren Zone geht dadurch das entsprechende Energiepotential verloren und die von der Verschlüsselung geforderte Impulsfolge kann nicht aufrecht erhalten werden. Der dazugehörige subjektive Eindruck lässt nach und verschwindet

schliesslich.

Dass die Verdeckung bei Klängen von Musikinstrumenten wirksam ist, konnte an Orgelklängen nachgewiesen werden.¹⁶⁾ Beim Klavierklang ist die Wirksamkeit der Verdeckung sehr wahrscheinlich. Wie die Abbildungen 38a-d erkennen lassen, werden zwei Zonen durch die Dämpfung begünstigt, weil umliegende Frequenzbereiche gedrosselt werden. Die begünstigten Bereiche liegen um 300 und 1200 Hz. Tatsächlich zeigen sich in diesen Bereichen für die subjektive Beobachtung auffällige Obertöne. Die im Lehrertest gesammelten Eindrücke 3.33/IV/H2, 3.33/VIII und 3.33/XI beziehen sich also auf nachweisbare Änderungen des Prüftones durch die Dämpfung. Auch 3,33/XIII lässt sich in diesem Zusammenhang interpretieren. Für den Hörer klingt der gedämpfte Ton mehr nach einem Ton als der ungedämpfte, weil mit zwei deutlichen Spitzen das Obertongefüge farblich eindeutiger erscheint als mit vielen, gegenseitig einander verdeckenden Bereichen.

Dass den Abbildungen 38a-d ein A_2 (27,5 Hz) und dem Lehrertest ein A_1 (55 Hz) zu Grunde liegt, entkräftet nicht die Beobachtung. Eigentümlicherweise sind die genannten Bereiche durch deutliche Obertöne bei allen tieferen Tönen vertreten. (Siehe 4.21)

3.353 Das menschliche Gehör ist auf räumliches Hören eingestellt. Es wertet Schallpegelgefälle und Schallrückwürfe sehr genau aus, und zwar unbewusst für den Hörenden. Blinde, die nachweislich jede räumliche Orientierung auf Abstand ihrem Gehör verdanken, glauben oft Abstände zu fühlen. Auch für den sehenden Menschen sind räumliche Klangeindrücke, wiewohl meist unbewusst, tägliche Erfahrungen.

Im Lehrertest (3.30) heisst es :

- 1.) "... der Ton fliesst davon".
- 2.) "... Der Klang ist im Saal deutlicher, ebenso die Klangfarbe".
- 3.) "Im Saal konnte ich besser hören".
- 4.) "Der Klang reicht weiter".
- 5.) "Im Saal waren Tonhöhen, Tonstärken und Akzente deutlicher zu unterscheiden".
- 6.) "Der Klang bereitet sich im Saal am besten aus."
- 7.) "Im Saal sind die Unterschiede deutlicher. Der Klang ist reicher und voller als im Studio, wo der Klang etwas blechernes hat."
- 8.) "Der Klang ist im Saal leichter zu erkennen und zu unterscheiden. Die Dauer des Klanges lässt sich im Studio leichter feststellen. Tiefe und Gewichtigkeit des Klanges lassen sich am ehesten im kleinen Saal unterscheiden."
- 9.) "Im Saal klang das Instrument nicht so laut, während es mir im kleinen Saal vorkam, als sei der Raum zunächst beklemmend leer und werde dann mit Klang überfüllt."
- 10.) "Studio: schneidender Klang; kleiner Saal : hallig;
Saal: runder Klang."

- 11.) "Ich konnte nur mit Mühe verschiedene Klänge im Saal unterscheiden. Das Klavier im Studio klingt deutlicher."
- 12.) "Im kleinsten Raum sind die Unterschiede zwischen den Tönen auffälliger".
- 13.) "Im Saal sind die Obertöne nicht so deutlich wie im Studio oder im kleinen Saal".

In acht Fällen sagt der Beobachter, dass er etwas deutlicher hört oder leichter unterscheidet. Die Deutlichkeit steht unmittelbar mit der Nachhallzeit im Zusammenhang. Schon sehr grobe Messungen zeigen (3.312), dass die drei Räume sehr unterschiedliche Nachhallzeiten haben. Die Unterschiede liegen weit über dem menschlichen Nachhallzeitschwellwert, der mit 4% angegeben wird.¹⁷⁾ Sind die Nachhallzeiten eines Schallereignisses unter verschiedenen Bedingungen sehr unterschiedlich, wie der Fall bei U und G in Abbildung 39, so lassen sich die Folgen für die Deutlichkeit in Abbildung 38a ablesen. M sei der Pegel des Schallereignisses zur Zeit t_0 . U sei der Pegel zur Zeit t_1 bei langer Nachhallzeit, G sei der Pegel zur Zeit t_1 bei kurzer Nachhallzeit. Wird M nun zur Zeit t_1 wiederholt, so ist der Eindruck im Falle G bei kurzer Nachhallzeit deutlicher, denn M liegt höher über G. M ist im Falle U mit längerer Nachhallzeit weniger deutlich, weil der Abstand zwischen M und U zur Zeit t_1 geringer ist. Für M ist U und G der Pegel eines Störuntergrundes. M wird je deutlicher, je höher es sich über den Störpegel erhebt.

3.354 Das ist aber nur eine Bedingung der Deutlichkeit. Nicht nur der Pegelabfall sondern auch die Form der Pegelkurve

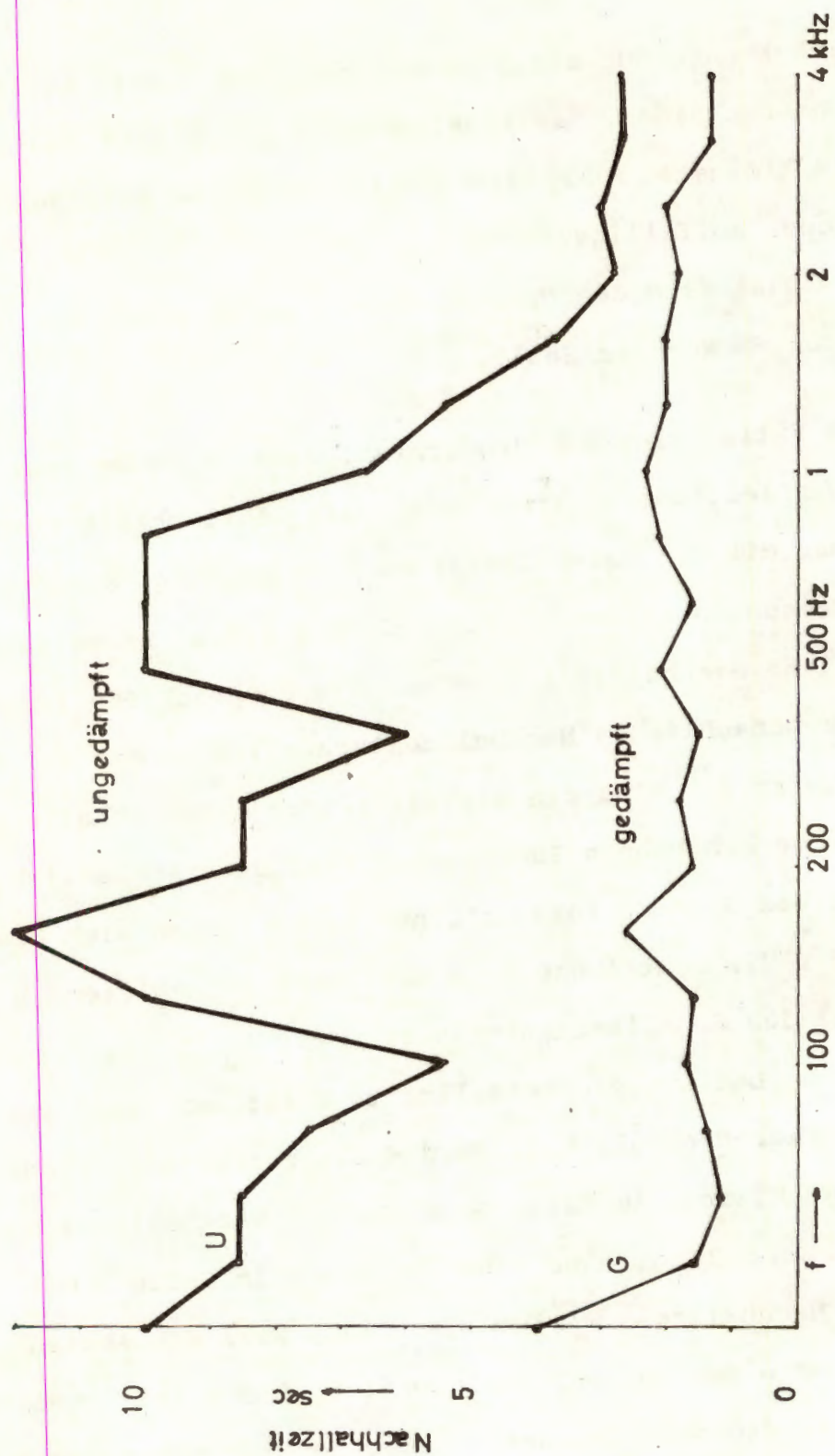


Abbildung 39

Das Pegelgefälle M/U und M/G der Polygone M, U und G aus Abbildung 38a in Nachhallzeiten dargestellt.

spielt eine Rolle. Erfahrungsgemäss fällt der Schallpegel in manchen Räumen gleichmässig und in anderen sehr ungleichmässig ab. Die Pegelkurven können dabei so unterschiedlich ausfallen wie die siebte und die siebzehnte der Abbildung 23. Das Ohr folgt diesen Kurven aber nicht wortwörtlich. Es arbeitet mit einer gewissen Trägheit. Es folgt daher der Pegelkurve, als ob es die Schallenergie kurzfristig speichere und den subjektiven Lautstärkeabfall in Abhängigkeit von den Schalldruckunterschieden am Eingang und Ausgang des Speichers empfinde. Man kann unter dieser Annahme den subjektiven Lautstärkeabfall von Schallereignissen bei bekannter Nachhallzeit in guter Übereinstimmung mit experimentell gefundenen Werten berechnen.¹⁸⁾ Eine solche Kurve idealisiert stark. Sie hat aber den Vorteil, ein Mass für die Verständlichkeit zu geben. Denn man kann zeigen, dass alle Unregelmässigkeiten der gemessenen Kurve, die über 3 dB höher liegen als die berechnete Kurve, die Deutlichkeit trüben.¹⁹⁾ Unregelmässigkeiten der gemessenen Kurve rühren von Schallrückwürfen im Raum her, die ihrerseits durch die geometrische Form des Raumes und die akustische Absorptionsfähigkeit des darin verbauten Materials bedingt sind. So ist es erklärlich, dass ein Raum mit kürzerer Nachhallzeit nicht unbedingt von grösserer Deutlichkeit der Hörsamkeit zu sein braucht.

Im Lebertest zeigt sich das darin, dass die Beobachter offensichtlich den Saal bevorzugten, obwohl dessen Nachhallzeit wesentlich kürzer als die längste (R_2) und wesentlich länger als die kürzeste (R_1) Nachhallzeit der Testserie war.

Natürlich spielt das Instrument auch eine Rolle. Es gehört aber zu den Eigenarten des Klavierklanges, dass man an ihm Begriffe wie Nachhallzeit und Deutlichkeit demonstrieren kann, wie eben geschehen, und dass man ihn mit der teils unbewussten, natürlichen Empfindlichkeit des Ohres für räumliches Hören wahrnimmt. Bewusst werden Eindrücke wie "Wärme" (3.33/IX), Plastizität ("rund" 3.33/XI), Farbigkeit (3.33/XI; 3.20/4,14; Abb. 36/4,14), Nähe und Ferne (3.33/III, "... der Ton fließt davon", 3.353/1). Im Gegensatz zum Raum hat das Instrument eine verstellbare Dämpfung, sodass der Spieler nach Gutdünken die Nachhallzeit seiner Töne bemessen kann. Wird bei Aufnahmen der Raumeinfluss ausgeschaltet, so liegt die unterste Grenze nahe an der Nachhallzeit des menschlichen Ohres, die mit 0,35s angegeben wird.²⁰⁾ Die andere Grenze liegt sehr weit entfernt davon. Man hat Nachhallzeiten von 80s bei Klavierklängen gemessen.²¹⁾

Abbildung 39 zeigt die Nachhallzeiten der in Abbildung 10 und 11 wiedergegebenen Töne innerhalb der ersten Sekunde. Der Messung liegen die Geraden von Abbildung 12 zu Grunde. Wie dort bei Sieb 1 angedeutet, wurde die Gerade zu einem rechtwinkligen Dreieck ergänzt. Dessen eine Kathete war parallel zur Zeitachse gezogen 30 mm lang, was hier einer Sekunde entspricht. Die andere Kathete wurde in Millimetern, die hier dB entsprechen, gemessen. Das Ergebnis wurde nach der Proportion:

$$n \text{ dB} : 1 \text{ s} = 60 \text{ dB} : x \text{ s}$$

in Nachhallzeit umgerechnet. Die so gefundenen Werte gelten nicht für den ganzen Ton, wie ein Blick auf Abbildung 20 lehrt.

Die siebte Kurve hat dort nach dem "Knick" einen Pegelabfall, der in Nachhallzeit 120 s ergäbe.

Die Nachhallzeiten innerhalb der ersten Sekunde sind jedoch die musikalisch bedeutenderen. Abbildung 39 zeigt, dass die Unterschiede beträchtlich sind. G Besteht aus Werten, die für optimale Nachhallzeiten in Konzertsälen genannt werden. Für kleinere Räume für Kammermusik gilt etwa 1 s Nachhallzeit als optimal, während für grosse Aufführungen der romantischen Oratorien- und Opernwerke Nachhallzeiten zwischen 2 bis 2,5 s Nachhallzeit bevorzugt werden.²²⁾

Für die Deutlichkeit gibt es im Musikbereich keine klar begrenzten Normen wie bei sprachlichen Darbietungen, wo man die Silbenverständlichkeit misst. Überdeutliche Räume sind in der Musik gar nicht gefragt, da die Musik im Klangzusammenhang und nicht im Einzelklang besteht. Schon der Sprachgebrauch zeigt aber, dass man Unterschiede in der Deutlichkeit künstlerisch wertet. Man spricht zum Beispiel von einem "schlanken, durchsichtigen Klang" im Gegensatz zu einem "breiigen, wüßtigen Klang". Beim Klavier klingt der pedalfreie Ton schlanker. Der Ton mit Pedal klingt "als ob darin etwas herumrollt", wie ein Hörer beim Lehrertest beobachtete. Reeder⁷³⁾ nennt den Pedalfreien Ton "well-focused". Mit Pedal gespielt, habe der Ton etwas verschwommenes. Die Abbildungen 10, 11, 13, 22, 23, 28 und 29 zeigen tatsächlich "deutliche" Pegelkurven. Dem ersten Gebot der Deutlichkeit, dass ein genügend grosser Störabstand zwischen den Anschlägen gehandhabt wird, entsprechen aber nur die Abbildungen 11, 13, 23 und 28. Beim Pedalgebrauch spielt der Zeitgeschmack eine grosse Rolle. Für

eine Puristenschule mit dem Ideal eines glasharten, pulver-trocknen Tones ist jeder Pedalgebrauch verpönt. Dass der Pedalgebrauch an sich verschiedene Grade der Deutlichkeit zulässt, zeigt ein Blick auf die Abbildungen 14, 16, 18, 24, 25, 26 und 27. Wieweit man bewusst "breiig" und bewusst "schlank" spielt, ist natürlich eine Frage des Stilgefühls. Das Instrument stellt jedenfalls die Mittel bereit.

3.355 Das räumliche Hören des menschlichen Ohres führt dazu, dass man in der Musik räumlich denkt. Es gibt vor allem in der Orchestermusik einen Klanguntergrund der im Hintergrund bleiben kann, im Gegensatz zur Klangoberschicht die im Vordergrund steht. Ein ähnliches Beispiel liefern die Harfen- und Lauteninstrumente, die alle einen Knick in der Abklingkurve haben. Ein Klang beginnt stark, vordergründig, verliert aber sehr schnell an Intensität und gerät in den Hintergrund. Einmal dort, bleibt er lange im Spiel, da nunmehr seine Pegelkurve sehr flach verläuft. Wie erinnerlich, hat auch der Klavierton diesen Knick (Abb. 20, Sieb 7). Da dieser aber verhältnismässig spät eintritt, kommt er in dieser Form für das künstlerische Spiel nicht in Frage. Anders der "künstliche" Knick (Abb. 13, 18, 25, 29). Da die Steilheit des anfänglichen Pegelabfalls und der Augenblick der Richtungsänderung wählbar ist, kann der Pianist bei jedem Tempo davon Gebrauch machen und seinem Spiel "Tiefe" verleihen.

3.356 Das menschliche Ohr beurteilt die Lautstärke je nach Zusammenhang. Ein Klavierton vorwärts und rückwärts auf Band

gespielt erzeugt zwei völlig verschiedene Eindrücke. Beim Rückswärtsspiel klingt das Maximum verhältnismässig schwach, da es durch ein crescendo vorbereitet ist. Vorwärts gespielt klingt der Ton stärker, weil er unvermittelt mit einem Maximum einsetzt. Bei bis zu zehn Anschlägen in der Sekunde kann das Ohr noch zwischen dem Maximum des Tones und dem dazwischen liegenden Lautstärkepegel unterscheiden.²³⁾ Je niedriger dieser Pegel gehalten wird desto lauter klingt der Ton. Dazu ist noch zu bemerken, dass es beim Klavierspiel sehr wenige Stellen mit mehr als 10 Anschlägen pro Sekunde gibt und ebenso sehr wenige mit weniger Anschlägen.

3.36 Tonhöhe, Klangfarbe

In Abbildung 38a ist kein Grundton des Prüfklanges enthalten. Extrapoliert man M nach links so wird deutlich, dass der Grundton unterhalb der Hörschwelle Hs liegt. Wie erinnerlich, ist Hs eine hypothetische Hörschwelle. Sie ist aber in der Tiefe sehr niedrig gewählt. Es ist also möglich, dass bei Messungen höhere Pegelwerte ermittelt werden. Das führt zu einem Widerspruch :

(W) obwohl der Grundton schwach im Spektrum erscheint, hört man den betroffenen Klang deutlich grundtönig.

In diesen Zusammenhang gehören drei Beobachtungen.

1.) Messungen unter 80 Hz zeigen oft zu niedrige dB - Lesungen an, da die Siebe in diesen Bereichen nicht die Qualität höherer Siebe haben.

2.) Selbst wenn man den etwa vorhandenen Grundton

heraussiebte, würde das Ohr den Grundton hören.

3.) Ganz allgemein zeichnen sich tiefe Töne auf Saiteninstrumenten durch schwache Grundtöne aus, weil die Resonanzböden klein im Verhältnis zur Wellenlänge der tiefen Komponenten dieser Töne sind. Zur Frequenz von A_2 (27,5 Hz) gehört beispielsweise eine Wellenlänge von 12,39 m, mehr als das Vierfache der grössten Ausdehnung der grössten Flügel mit etwa 2,80 m.

Die Beobachtung 1 kann den Widerspruch (W) nicht genügend erklären. Die Messungen können zwar um 20 bis 30 dB zu niedrig ausfallen, aber selbst dann wären die tieferen Bereiche eben gerade an der Hörschwelle und keineswegs beherrschend. In der Form G fielen sie wiederum unter die Hörschwelle ohne etwas an der subjektiv wahrgenommenen Grundtönigkeit zu verändern.

Die Beobachtung 2 wird durch die Beobachtung 3 gestützt. Eben weil die Grundtönigkeit im Gehörzentrum und nicht auf dem Instrument zustande kommt, hat man die Instrumente "nach Gehör" entwickelt und befriedigend gefunden. Mit einigen wenigen Ausnahmen sind keine Versuche gemacht worden, die Resonanzböden der Saiteninstrumente wesentlich zu vergrössern. Keiner der vergrösserten Entwürfe hat sich im Instrumentenbau durchgesetzt.

Die Beobachtung 2 geht auf Untersuchungen von Seebeck²⁴⁾ zurück. Schouten²⁵⁾ führte diese weiter und lieferte damit einen Beitrag zur Theorie einer doppelten Tonhöhenbewertung. Duifhuis²⁶⁾ fusst auf derselben Theorie und zeigt, dass nicht nur gewisse tiefe sondern auch hohe Komponenten

auch dann hörbar sind, wenn man sie aus einem Klang heraus-siebt. Pfundner²⁷⁾ zeigt, dass sich der Schlagton bei Glocken mit dieser Theorie erklären lässt. Die besagt, dass bei zahlreichen höheren Komponenten eines Klanges den Elementargebieten des Corti'schen Organs bereits modulierte Schwingungen zugeführt werden. Die Verschlüsselung in elektrische Signale erfolgt dann, als sei dort ein Satz von Filtern eingebaut, die ihre Spannung und die Periodizität ihrer Spannung weitergeben. Da in der Bandbreite dieser Filter mehrere Partialtöne enthalten sein können, erscheinen schliesslich im Klangeindruck auch solche Obertöne, die man ausdrücklich entfernt hat, solange eng benachbarte Obertöne die Spannung im Filter aufrechterhalten. Aus der Periodizität der gemeldeten Filterspannung "erschliesst" das Hörzentrum den Grundton. Dieser wird daher auch dann wahrgenommen, wenn er im Spektrum gar nicht anwesend ist.

Dass der Grundton der tiefen Klaviersaite akustisch unbedeutend ist, zeigt ein einfaches Experiment. Man hebe den Dämpfer von der Saite und zupfe die tiefste Saite energisch von Hand an. Obwohl die Saite dabei weiter als je beim Spiel aus der Ruhelage gebracht wird, kommt ein völlig undefinierbarer Klang zustande. Vom Hammer angeschlagen, hat der Klavier-ton sehr viele Teiltöne. Es fragt sich daher, ob sich eine Andeutung darüber finden lässt, welche Partialtöne den "künstlichen" Grundton aufbauen. Dazu folgendes:

3.37 I.) Es besteht ein starker Verdacht, dass die Modulation der Pegelkurven 5, 7, 8, 9, 10, 12 und 13 etwas

damit zu tun hat. (Vergleiche Abb. 10) Der Papiervorlauf bei diesem Beispiel war auf 30 mm/s eingestellt und auf diese 30 mm zählt jede der Kurven 29 Zacken. Das ist sehr wahrscheinlich die Frequenz des Grundtones, die etwas höher ist, als der Sollwert 27,5 Hz. Welche Teiltöne zu diesen Sieben gehören zeigt folgende Tabelle.

Sieb	Mittenfrequenz in Hz	Teiltöne
5	125	4,5
7	200	7,8
8	250	8,9
9	315	9 - 13
10	400	13 - 16
12	630	18 - 22
13	800	28 - 34

Dass im Klavierton tatsächlich alle diese Teiltöne anwesend sind, ist in dieser Arbeit nicht eigens nachgewiesen worden. Wie eine Schmalbandanalyse von Blackham zeigt²⁸⁾ (Abb. 40), ist das aber sehr wahrscheinlich.

Dass die siebte Kurve in Abbildung 10 nach dem Dämpferaufsatz glatt verläuft, muss so gedeutet werden, dass einer der darin enthaltenen Partialtöne sofort völlig gedämpft wird, sodass nur ein Partialton für den letzten Pegelabfall übrigbleibt. Wie erinnerlich liegt der "Anschlagspunkt" (1.2) und damit auch der Dämpfer zwischen $1/7$ und $1/9$ der Saitenlänge. Der Dämpfer kann also je nach Lage einen der beiden in Sieb 7 enthaltenen Partialtöne wirkungsvoller als den anderen dämpfen. Subjektiv äussert sich das darin, dass ein flageoletthafter Klang übrig bleibt, während der grundtönige Klang verschwindet. Wahrscheinlich ist der 8. Partialton derjenige, der

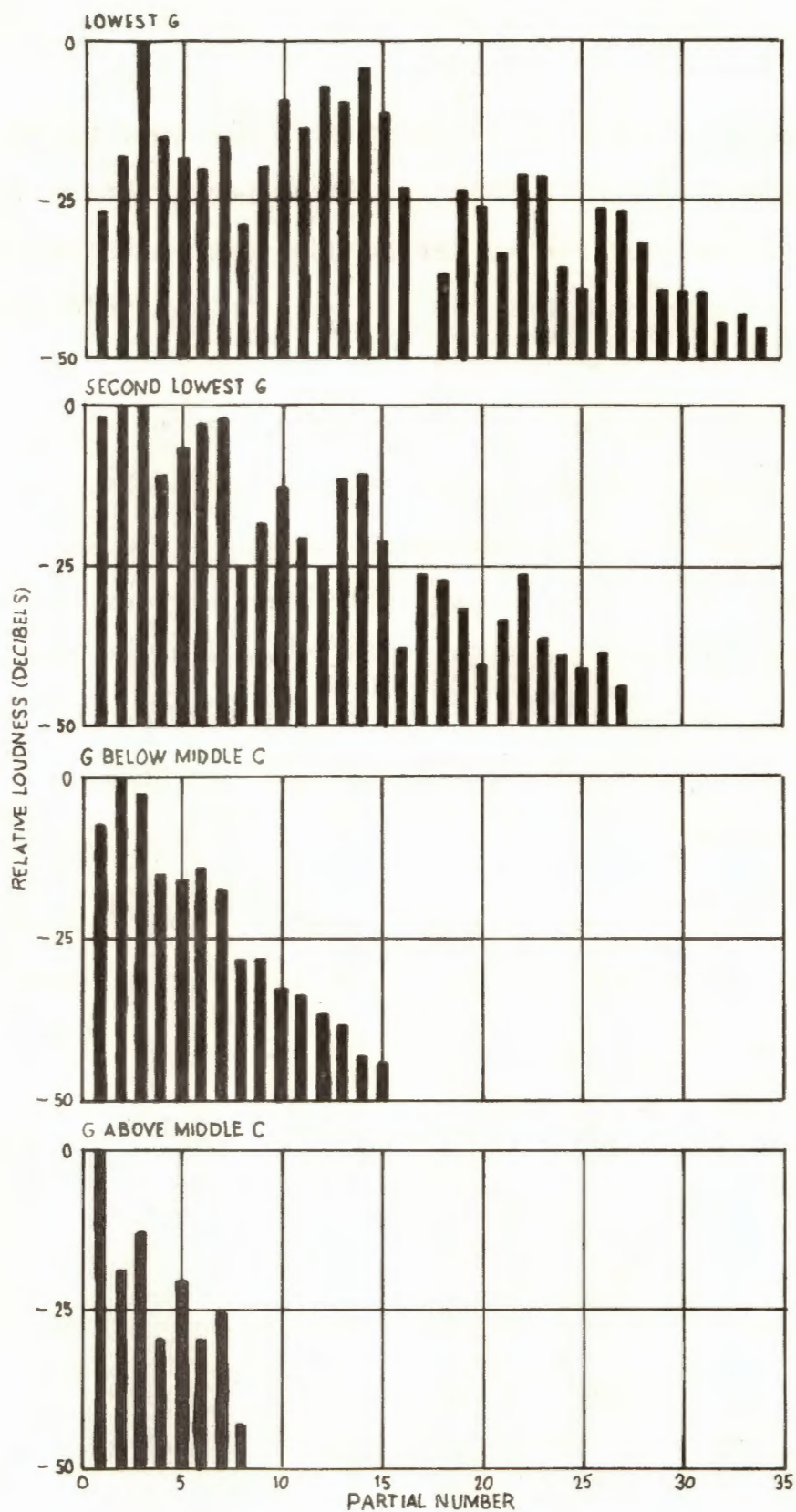


Abbildung 40

Tiefe Klaviertöne haben ein sehr breites Spektrum

länger zu hören ist. Subjektiv lässt sich das aber schwer feststellen, da die Partialtöne in dieser Lage schon stark verstimmt sind und der siebte der Tonhöhe nach auch der achte oder neunte sein könnte. Das Ohr ist erstaunlich tolerant für Klänge mit falschen Obertönen. Man hat gefunden²⁹⁾, dass selbst bei Verstimmungen, die den dritten Oberton auf die Tonhöhe des vierten heraufstimmen, Klänge und nicht etwa Geräusche oder Mehrklänge wahrgenommen wurden.

Dass die Zacken in den Siebkurven mit der Frequenz der analysierten Klänge zusammenhängen, wurde durch eine Auszählung der Zacken in den Siebkurven eines Akkordes mit den Tönen F -f - f' - a' - c'' - f'' bestätigt. Die Zählung erbrachte folgendes:

Sieb	80	100	125	160	200	250
Zacken	20;32	21	21	42	42	42
entspricht	F;C	F	F	F	F	F
Sieb	315	400	500	630	800	1000
Zacken	21	42	27	42	16	32
entspricht	F	F	A	F	C	C
Sieb	1250	1600	2000	2500	3150	4000
Zacken	32	32	32	32	32	32
entspricht	C	C	C	C	C	C

Ein eigentümliches Beispiel ist das Sieb 80 Hz, in dem zunächst 21 und später 32 Zacken zu zählen sind.

Die Auszählung war deswegen schwierig, weil die Aufnahme nicht von vorneherein für diese Art der Analyse bestimmt und bei nur 3mm/s Papiervorlauf sehr eng geschrieben war.

3.38 II.) Auch der völlig ungedämpfte Ton bringt Hinweise darüber, welche Partialtöne den Grundton aufbauen. (Abb. 20) Wie in 2.54/IV befunden, erreichen im ungedämpften Klang die Pegelkurven der verschiedenen Siebe die Ruhelage zu verschiedenen Zeitpunkten. Die Kurven 7, 8 und 9 verweilen am längsten. Das hat sicherlich damit zu tun, dass in dieser Frequenzlage die Wellenlänge das beste Verhältnis zur Ausdehnung des Resonanzbodens hat, nämlich rund 1 : 1. Die Kurven 1 bis 6 der Abbildung 20 zeigen Grundrauschen und zählen hier deswegen nicht. Bei subjektiver Beobachtung erlischt nun die Grundtönigkeit des Klanges erst kurz bevor die Kurven 7 und 8 endgültig abgeklungen sind. Es genügen offenbar ein oder zwei Siebe, um die Grundtönigkeit subjektiv aufrecht zu erhalten.

Die Kurve 8 zeigt periodische Zu- und Abnahmen in der Modulation. In diesem Sieb befinden sich der achte und neunte Teilton. Einer von den beiden, nach subjektiver Beobachtung der neunte, schwingt vermutlich in einem Bereich, den sich zwei gekoppelte Systeme des Instrumentes teilen. Es zeigt sich daher eine sehr langsame Amplitudenmodulation. Dass es sich nicht um eine Schwebung handelt, bestätigt die Beobachtung der Klangfarbe. Denn bei den "Nulldurchgängen" hört man den achten Teilton aufklingen, während bei den Maxima der Grundton auftritt. Das bleibt so bis gegen Ende, wo der neunte Teilton schliesslich so schwach wird, dass der achte allein weiterklingt. Subjektiv hat man dabei deutlich den Eindruck, dass der eigentliche Ton zu Ende ist und der verbleibende Ton nur ein entferntes Echo heranträgt.

In Abbildung 13 zeigt sich, dass ein kurzer Gebrauch des Dämpfers genügt, um die Modulation des siebten Siebes völlig

zu unterdrücken. Tatsächlich taucht damit im Klangeindruck der achte Teilton deutlich auf. Auch beim Vergleich von den Abbildungen 10 und 11 zeigt sich, dass die Modulation in manchen Sieben unterdrückt oder aufgehoben wird, so in den Sieben 5, 7, 9, 10 und 12. Dabei geraten mehr oder weniger deutliche Obertöne in den Klangeindruck. Beobachter, die eine Veränderung in der Klangfarbe bemerkten, werden damit bestätigt (Vergl. Abb. 36/4,14 ; 3.33/IV/VIII/XI/XIII).

3.39 Die Obertöne sind jedoch unsauber. Das ist zu erwarten, da nur eine dimensionslose, "gedachte" Saite saubere Obertöne hervorbringt. Wie falsch sie sind, kann man erfahren, wenn man einen Klavierton soweit verklingen lässt, dass man Obertöne heraushört. Man vergleicht diese dann mit dem Grundton. Genauere Messungen ergeben, dass mit zunehmender Ordnungszahl der Partialtöne die Verstimmung nach oben hin zunimmt.³⁰⁾ Der Beobachter, der die gedämpften Töne "falsch" hörte (3.33/VIII), war völlig im Recht, ebenso der, dem es vorkam, als ob der Ton gegen Ende höher werde (3.33/VII).

3.40 Über den höheren oder tieferen Klang von Tönen, die mit oder ohne Pedal gespielt werden, widersprechen sich zwei Beobachter (3.33/VII). Zu dieser Frage gehören drei Beobachtungen.

1.) Bei Tonhöhenunterschieden unterhalb einer kleinen Sekunde werden Beobachter bei der Beurteilung unsicher, wenn die Vergleichstöne nicht unmittelbar nach einander gespielt werden. Es könnte also sein, dass ein Beobachter irrte,

da zwischen den Anschlägen der einzelnen Töne beim Test Verständigungen wie "noch einmal bitte" und ähnliches eingeschoben wurde.

2.) Ein Vergleich von den Abbildungen 10 und 14 zeigt zweierlei. Erstens ist der einzige Bereich, der von vorneherein bei Abbildung 14 höher ist als bei Abbildung 10 das Sieb 5 mit dem vierten und fünften Teilton. Da diese Teiltöne weniger verstimmt sind als die höherliegenden, könnten sie durch stärkeres Hervortreten den subjektiven Grundton herabdrücken. Zweitens zeigt Sieb 6 im Gegensatz zu Abbildung 10 in Abbildung 14 starke Modulation. Der ursprünglich allein anwesende sechste Teilton wird von dem stärker ausgefallenen und daher in Sieb sechs überfliessenden fünften Teilton moduliert. Er verschwindet damit als hörbarer Teilton. Sein Ausfall könnte den Eindruck erwecken, dass der ganz Ton absinkt. Gegen Ende taucht der sechste Teilton allerdings wieder auf, ebenso der achte. Wie erinnerlich kann das dazu führen, dass man den Ton nach oben gleiten hört. Es kann allerdings auch zur Überzeugung führen, dass der Ton bis dahin zu tief gewesen sei.

3.) Der menschliche Tonhöhereindruck ist abhängig von der Lautstärke. Man kann das selbst beobachten, indem man die Tonhöhe einer Stimmgabel bei verschiedenen Abständen vom Ohr vergleicht. Messungen (Abb. 41) haben ergeben, dass höhere Frequenzen aufwärts, tiefere abwärts neigen, wenn die Intensität erhöht wird. Nun sind Töne bei aufgehobenem Pedal lauter als bei ruhendem Pedal. Das haben die Testhörer richtig beobachtet (3.33/XVI). Denn das Ohr analysiert die Intensität

nach Frequenzgruppenbreiten. Je mehr Schallereignisse in einer Frequenzgruppe eintreten, je tiefer sinkt die Hörschwelle für die Gruppe. Das ist aber bei aufgehobenem Pedal für alle Frequenzgruppen der Fall, da über den Steg und andere mechanische Teile des Instruments viele nunmehr ungedämpfte Saiten angeregt werden. Der Klang wird also im gesamten Frequenzbereich verstärkt. Ob der Ton subjektiv höher oder tiefer empfunden wird, kann daher davon abhängen, in welchem Frequenzgebiet der Hörer für zunehmende Lautstärke am empfindlichsten ist. Es ist daher möglich, dass beide Beobachter einen für sie geltenden Eindruck richtig beschrieben haben.

3.5 Bei höheren Tönen sind keine beständigen Modulationen in den Siebkurven gefunden worden.
(Über den subjektiven Eindruck siehe 4.21)

4.00 Die Einordnung des Befundes.

Es verbleiben zwei Aufgaben. Da ist erstens die Untersuchung, ob sich die hier herausgestellten Zusammenhänge mit früher geäußerten Beobachtungen und Meinungen anderer Autoren verbinden lassen. Zweitens ist da der Versuch, subjektive Beobachtungen beim Klavierspiel wenigstens teilweise anhand der hier gefundenen Tatsachen zu deuten.

4.10 Die folgenden fünf Zitate gelten für die Dämpfung allgemein:

I "Es muss also die Arbeit des Dämpfers, nicht allein die des Hammers, die Ursache für die Beeinflussung der Tonfärbung bei den verschiedenen Anschlagsarten sein."³¹⁾

II "Man sucht durch Belassen von Filzgewebespitzen oder eines Teiles des Dämpfers an den Saiten das Abtöten nur teilweise zu bewerkstelligen, wodurch die Tonsumme unbestimmt, verschwommen klingt. Die tieferen Töne bleiben wegen der breiteren Amplitude dabei etwas länger wirksam als die höheren."³²⁾

III "Young showed that the harmonic content of a note changes with the time because the damping effect differs very considerably for the different harmonics present in a string. This fact provides a further means of tone control available to the pianist."³³⁾

IV "In reaching the conclusion that the pianist cannot control quality separately from loudness by his manner of striking, the writers of course exclude the use of the damper, whether actuated by hand, through the medium of the key or by foot, by use of the pedal. It is obvious that a string whose vibration is being damped by contact of a felt pad at a certain point will emit a tone which differs in quality from that of an undamped string, quite apart from the fact that the loudness changes more rapidly in the former case than in the latter."³⁴⁾

V "It is true that the quality depends upon the

waveform. But it also depends upon the pitch, the loudness, the decay and attack time, the variation with time of the intensity of the partials, the impact noise of the hammer, the noise of the damping pedal, and also the characteristic ending of the tone by the damping felt, etc."³⁵⁾

Mit Ausnahme von II stimmen diese Zitate mit dem Befund der vorliegenden Arbeit überein. II weist auf den gradweisen Gebrauch der Dämpfung. Die daraus gezogenen Folgerungen widersprechen den hier vorgelegten Beobachtungen, indem die "Tonsumme unbestimmt, verschwommen" klingen soll. Immerhin sind diese Beobachtungen vor so langer Zeit gemacht worden, dass man die damals gespielten Instrumente für den Unterschied verdächtigen kann. Bei den für die vorliegende Arbeit untersuchten Tönen führte die Dämpfung zu dem subjektiven Eindruck des Aufhellens. Die Beobachtung, dass tiefere Töne der Dämpfung stärkeren Widerstand als höhere leisten, stimmt mit den hier vorgelegten Befunden überein.

4.11 Zitate zum Pedalgebrauch lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Erstens sind da solche, die ganz allgemein auf die Bedeutung des Pedalspiels für die Tonfärbung beim Klavier hinweisen.

I "Der Klavierton bekommt seine eigentliche Grösse erst mit Hilfe des rechten Pedals, und kann ich darum der Ansicht nur zustimmen, dass als normaler Zustand das Freischwingen aller Saiten zu gelten hätte und das rechte Pedal nur das Abdämpfen und Schweigen der Töne besorgen müsste...
... "³⁶⁾

II "Thalberg et Chopin se servaint des pedales avec une rare habilité, et les employaient d'une facon presque incessante."³⁷⁾

III "C'est une étude de tout la vie."³⁸⁾

IV ".... for variety in quality, however, the modern pianist relies chiefly on the pedals."³⁹⁾

V "... he uses the pedal to connect these notes and to colour his playing."⁴⁰⁾

VI "Indeed, the very tone colour would be poor without pedal, which is here used chiefly for beauty and resonance of tone."⁴¹⁾

VII "Professional pianists use the pedal very much more than amateurs, but it will not be so apparent in their playing."⁴²⁾

VIII "It is well known, of course, that the use of the sustaining pedal introduces additional physical elements which affect the sensations experienced by the player and the listeners."⁴³⁾

IX "Charakteristisch für die Pedalwirkung ist..... die Änderung der Klangfarbe bei Pedaltönen im Vergleich zu pedalfreien Tönen. Diese Änderung erfolgt, wie wir wissen, durch das Mitklingen der beim Anschlag nicht beteiligten Saiten und ist abhängig von der Oktavenlage sowie von der Stärke des Anschlags."⁴⁴⁾

X "Der Einfluss des Pedals beim Flügel äussert sich vor allem in den Abklingkurven. Es werden in der tiefen Lage Dämpfungswerte von 1 db/sec und darunter beobachtet."⁴⁵⁾

Es gibt hier nichts widersprüchliches gegenüber dem Befund der vorliegenden Arbeit. Allerdings sind alle Zitate sehr allgemein gehalten. Interessant ist VII. Das "not so apparent" kann so interpretiert werden, dass der vollausgebildete Pianist einen allmählichen Übergang zwischen den Klängen mit und ohne Pedalgebrauch herstellt. Der Dilettant tut das nicht und macht deshalb durch den ruckhaften Farbwechsel seines Spiels auf seinen Pedalgebrauch aufmerksam.

4.12 In der zweiten Gruppe der Zitate zum Pedalgebrauch geht es um das Für und Wider des sogenannten "halben" Pedals.

I "Durch sehr rasches, kurzes Treten des Pedals, wobei oft auch die Dämpfung nicht ganz aufgehoben wird, lässt sich die Pedalwirkung in solchen und ähnlichen Fällen schattieren und der Klavierton mit weiteren Färbungen bereichern."⁴⁶⁾

II "Es ist ferner keineswegs gleichgültig, ob ich die Pedale tief trete oder nur leicht und zart nehme." Der "volle Tritt" löst eine volle Wirkung aus, während ein leichtes Aufheben der natürlichen Dämpfung einzelner Töne wie ganzen Chören einen mehr ätherischen Charakter verleiht."⁴⁷⁾

III "Mit dem "halben" Pedal kann man auch das sonst am Klavier unmögliche sfp auf einem einzigen Ton erreichen, wird es aber nur an einem Instrument wagen, mit dem man sehr ver-

traut ist; andernfalls hat man den Grad der Abschwächung nicht hinreichend in der Gewalt."⁴⁸⁾

IV "Der Einfluss des Pedals auf das Verschwinden eines Klanges ist fast noch grösser als auf sein Bestehen. Nimmt man ohne Pedal einfach den Finger von der Taste weg, so wirkt das, als ob der Ton, namentlich der Forte-Ton, plötzlich abgehackt würde. Wird aber der pedalisierte Ton, nachdem der Finger die Taste verlassen hat, durch aufheben des Pedals zum Erlöschen gebracht, so entschwebt er auf viel sanftere Art. Es ist nicht gleichgültig, mit welcher Geschwindigkeit der Finger die Taste aufgibt, wenn kein Pedal genommen wird, und erst recht ist es nicht einerlei, ob der Fuss den Pedalhebel langsam oder schnell nach oben gehen lässt."⁴⁹⁾

Diese Ansichten bestätigen sich durch den Befund dieser Arbeit. Es gibt aber auch Autoren, die gegen den Gebrauch des halben Pedals warnen :

V "It is very seldom a good idea to hold the pedal in a sort half-and-half position where the notes are neither held nor damped."⁵⁰⁾

VI "When the damper is lowered slowly, it grazes the vibrating string before completely stopping tone, producing an unpleasant yowling sound."⁵¹⁾

VII "(soft damping) "... it is in truth a dangerous process, extremely difficult to judge, and quite liable to cause queer sounds or "harmonics".⁵²⁾

Natürlich ist es Auffassungssache, was für das Klavierspiel gut oder nicht gut ist. Die Beobachtung von "queer sounds" und "unpleasant yowling sound" ist aber zutreffend. In den Abbildungen 10, 16, 22, 24, 26 und 29 dieser Arbeit wird gezeigt, wie das in der Pegelpartitur aussieht. Es sind dies die mehrfach besprochenen Dämpferaufsatzreaktionen, die gelegentlich subjektiv störend hörbar werden. Der erfahrene Pianist lernt, durch rechtzeitiges, mehrmaliges Durchtreten des Pedals diesen Effekt zu vermeiden. Das "sehr rasche, kurze Treten des Pedals" bei I bezieht sich auf diese Technik. Ähnlich rät Georgii: "Das manuelle Diminuendo muss hier durch mehrmaligen, flüchtigen Pedalwechsel unterstützt werden."³⁶⁾

Jaulen tritt nur dann störend auf, wenn die Dämpfung für einige Zehntelsekunden unverändert in derselben "halben" Lage belassen wird, wie der Fall war bei Abbildung 16. Auf die rechtzeitige Ausweichreaktion des Spielers bezieht sich Bowens "extremely difficult to judge".

4.13 Die nächste Gruppe von Zitaten bezieht sich auf die Rolle des einzelnen Dämpfers.

I "Ebenso wichtig wie das Erzeugen ist das Abschliessen des Tones für die poetische Wirkung desselben. Dieses kann vor allem durch das rechte Pedal bedingt werden, welches ja, nachgetreten, sogar ein kleines cresc. auf einem liegenden Ton ermöglicht. Letzterer ist übrigens auch ohne Zuhilfenahme des Pedals immerhin ein klein wenig veränderlich, da durch ganz leichtes Nachschwingen des Fingers auf der Taste die Zwischenräume zwischen schwingender Saite, Hammer und Dämpfer und

somit die Schwingungen selbst infolge der Bewegung des Hammers und des Dämpfers beeinflusst werden."⁵³⁾

II Schneider ("Musik, Klavier und Klavierspiel," Leipzig 1884, S. 3) sagt darüber, dass Mendelsohns Fähigkeit, den Ton nach dem Anschlag zu modifizieren durch Schieben oder Druck mit dem Finger, das Entzücken seiner Bewunderer gewesen sei. Ein Beispiel bester Art für Selbst- und Massensuggestion.⁵⁴⁾

III "Sobald man nach erfolgtem Anschlag den Finger senkrecht von der Taste rasch nach oben zurückführt, erhebt sich die Taste rasch und der Ton bricht ab. Wenn aber durch eine Roll- oder Gleitbewegung der Finger sich in einer Kurve von der Taste entfernt, er hebt sich die letztere allmählich, und der Ton, statt kurz abzubrechen, klingt allmählich aus."⁵⁵⁾

IV "Wir beobachten, dass bei einem Spiel, das wir mit unserem "Senkspiel - Druckspiel" möglichst charakteristisch zu bezeichnen versuchten, in Verbindung mit dem Gleiten auf der Taste die Dämpfer sich allmählich gleichsam begütigend auf die Saiten senken oder aufsetzen, während sie beim sogenannten Fingerspiel (schnelles loslassen der Tasten), herunterfallen. Wir nehmen an, dass dadurch der Ton, anstatt plötzlich unter hörbarem Nachdrängen der Obertöne abzufallen, allmählich abklingt, ohne dass, wenigstens in der Mittellage der Klaviatur, störende Obertöne sich bilden."⁵⁶⁾

Diese Vermutungen und Beobachtungen passen in das Bild, das in der vorliegenden Arbeit von der Wirkung des Dämpfers entstanden

ist. Mendelsohns "modifizieren" kann durchaus als eine besondere Technik der nachträglichen Dämpfung einzelner Saiten durch geschicktes Spiel mit den Tasten verstanden werden. Von Massensuggestion kann nach dem Gruppentest mit Tonbandaufnahmen keine Rede mehr sein.

4.14 Die Ansichten der folgenden Autoren zum Klavierklang allgemein lassen sich vertreten, wenn man annimmt, dass der Dämpfergebrauch ein wesentliches Merkmal in der Spieltechnik bei den betroffenen Künstlern ist.

I Jedenfalls beobachten wir bei jedem künstlerisch gebildeten Klavierspieler eine gewisse individuelle Tonbildung, die sich ihrerseits dann wieder in eine Reihe weiterer klanglicher Abstufungen gliedert.⁵⁷⁾

II Nach unserem Willen lässt sich demnach ein Klavier-ton hell oder dunkel gestalten.⁵⁸⁾

Eine überraschende Bestätigung der Antworten zur Frage 11 beim Studententest bringt Winckel:

III "Auch das Abklingen des Klavierklanges (unterhalb c^3) ist infolge der stetigen Intensitätsabnahme ständigen Verstimmungen zu höheren Tonhöhen unterworfen, wie man leicht aus dem Diagramm Abb. 47 herauslesen kann. Anscheinend liegt der Reiz des Klavierklanges in diesen ständigen Umstimmungen, denn hier erfüllt sich der beständige Reizwechsel, dessen das Ohr zu ästhetischen Empfindungen bedarf."⁵⁹⁾

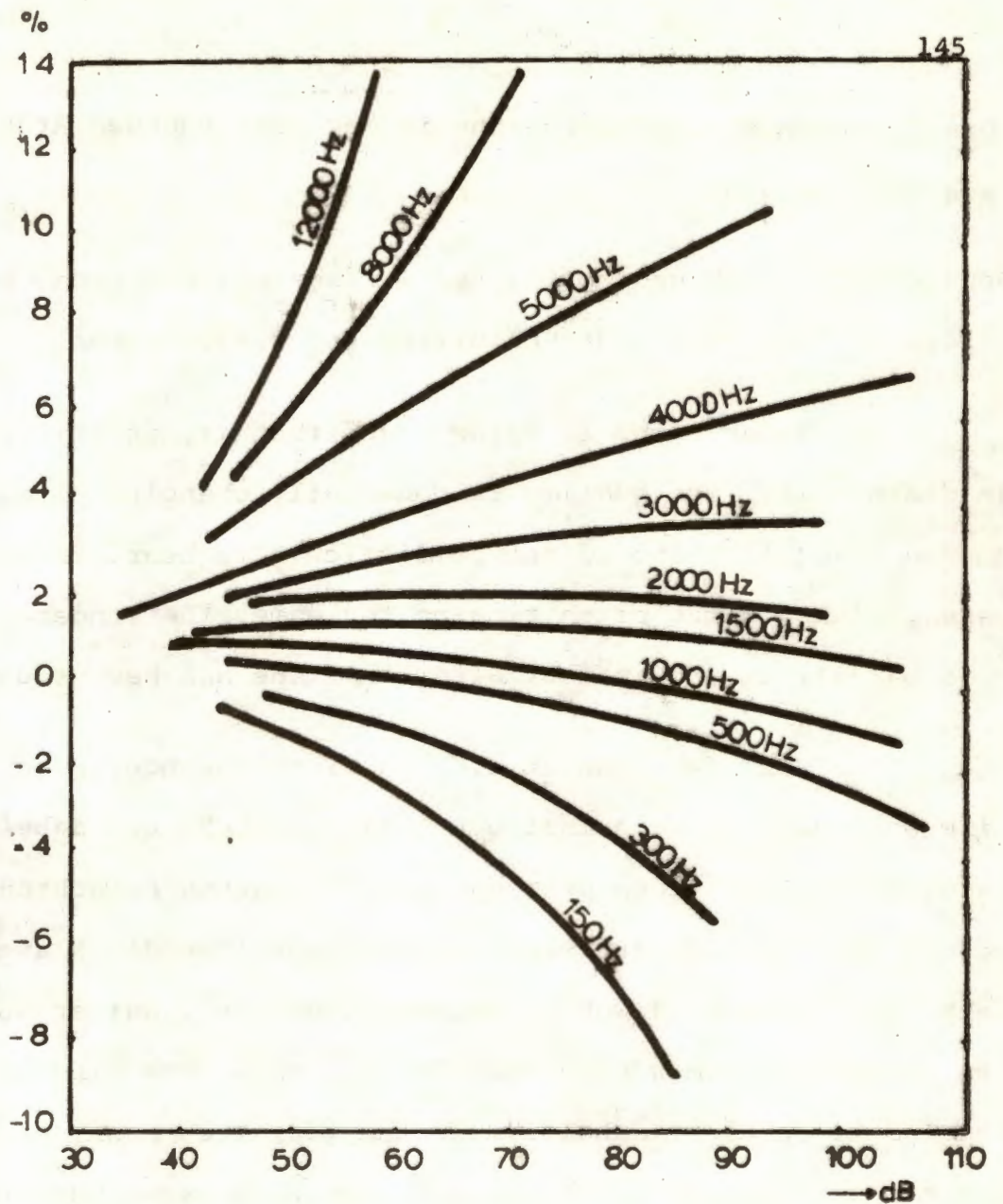


Abbildung 41

Die Abhängigkeit von Tonhöhe und Intensität. Ein Ton von 300 Hz klingt bei 90 dB tiefer als bei 50 dB.

(Das Diagramm Abb. 47 erscheint in der vorliegenden Arbeit als Abbildung 41)

Den Befund über ungedämpfte, bei durchgetretenem Pedal verklingende Töne bestätigt Schauffler und Trendelenburg.

"As any tone is dying down, that is, as its volume is diminishing, its quality is constantly changing also. This change in quality should not be difficult to hear. In some cases, although the pitch remains the same, the fundamental dies out almost the instant after the tone has been sounded."⁶⁰⁾

"Wenn der Pianist z.B. an einer besonderes cantilenen Stelle in sein Instrument hineinhört und dabei ein längeres Gleichbleiben oder gar nachträgliches Anwachsen einzelner Teiltöne während eines an sich abklingenden Klanges wahrnimmt, so ist es wohl einzusehen, dass er, der er in diesem Moment von dem Wunsch beseelt ist, möglichst singend und tragend zu spielen, dabei dem Irrtum verfallen kann, er habe derartige Phänomene durch einen freien Willensakt hervorgerufen. In Wahrheit handelt es sich um Vorgänge, die in den Eigenschaften des Instrumentes begründet sind und die ständig in gleicher Weise in Erscheinung treten. Nur: beim Adagio cantabile achtet man darauf, beim Allegro con brio dagegen nicht."⁶¹⁾

4.15 Sicherlich unzutreffend ist nach dem vorliegenden Befund die folgende Ansicht:

I "An dieser Stelle sei ein kurzer Ausblick nach der

musikalischen Seite eingefügt. In der Klavierpädagogik tobt seit vielen Jahren ein heftiger Streit über die Frage, ob der Pianist den Klavierklang nach erfolgtem Anschlag noch von der Taste aus beeinflussen kann oder nicht. Massgebende Physiker, unter ihnen vor allem Max Planck, haben zu dieser Frage übereinstimmend erklärt, dass eine solche nachträgliche Beeinflussung nicht möglich ist. Diese Ansicht, die ja, physikalisch betrachtet, auch die einzig verständliche ist, hat sich heute schon allgemein durchgesetzt. Trotzdem wird auch die gegenteilige Auffassung von manchen namhaften früheren und auch zeitgenössischen Künstlern noch mit allem Nachdruck vertreten. Dass dabei ein Trugschluss vorliegen muss, steht für uns ausser allem Zweifel.⁶²⁾

Der Trugschluss liegt darin, dass man annahm, jede Beeinflussung des Tones müsse beim Anschlag geschehen. Der Schluss folgt dem klassischen MODUS BARBARA und liegt unausgesprochen allen folgenden Zeugnissen der Physiker zugrunde. Er lautet:

- | | |
|----------------|--|
| P ₁ | Alle Beeinflussungen sind Anschlagsformen. |
| P ₂ | Alle Anschlagsformen sind Variablen der Hammergeschwindigkeit. |
| C | Alle Beeinflussungen sind Variablen der Hammergeschwindigkeit. |

Die Folgerungen der Physiker sind daher nicht zwingend. Die fragwürdige erste Praemisse ist allerdings nicht von Physikern aufgestellt worden:

- II I. Grundsatz: Jeder angeschlagene Ton liegt nach Tonstärke und Klangfarbe im Bruchteil einer Sekunde fertig vor

und entzieht sich nach dem Anschläge jeder ferneren persönlichen Einwirkung.⁶³⁾

Die Zeugnisse der Physiker sind:

III "Bezüglich der Wirkung des Anschlages auf die Klangfarbe bei dem modernen Klavier bin ich durchaus Ihrer Meinung. Der Ton der Saite ist seiner Stärke und Klangfarbe nach eindeutig bestimmt durch die Geschwindigkeit, mit welcher der Hammer die Saite trifft. In welcher Weise die Taste niedergedrückt wird, ist gleichgültig, wenn die dem Hammer mitgeteilte Geschwindigkeit dieselbe ist."⁶⁴⁾

IV "Vor allem bin ich vollkommen einverstanden mit der Hauptfolgerung, die Sie aus der Betrachtung der physikalischen Vorgänge ziehen, und die ich so formulieren möchte: Eine Beeinflussung der Klangfarbe der Saite durch die Art des Anschlages kann, sofern der Hammer frei gegen die Saite fliegt, nur durch eine verschiedene Geschwindigkeit des Hammers, also durch verschiedene Tonstärke bewirkt werden. Denn die Geschwindigkeit, mit der der Hammer die Saite trifft, ist die einzige Variable, über die der Spieler verfügen kann. Das ist physikalisch nicht anders denkbar." (Späterer brieflicher Zusatz:) "Dieser Satz behält seine Gültigkeit, unabhängig davon, ob der Hammer hart oder weich, ob die Berührungstelle von Hammer und Saite breiter oder schmaler, ob die Berührungsdauer länger oder kürzer ist. Ich bin nach wie vor Überzeugt, dass kein einziger Physiker diesem Satz seine Zustimmung versagen wird."⁶⁵⁾

V "Vom physikalischen Standpunkt ist es selbstverständlich, dass der Hammeranschlag gegen die Klaviersaite nur eine einzige Variable, nämlich die Geschwindigkeit, besitzt. Ich bin durchaus derselben Meinung wie Herr E. Tetzl."⁶⁶⁾

VI "Mit den Sätzen meines Kollegen Planck bin ich vollkommen einverstanden.- Es scheint mir, dass Hammerschwingungen schon vor der Berührung mit der Saite infolge des Anschlags der Taste entstehen können. Es handelt sich dabei, wenn Sie wollen, um Spitzfindigkeiten. Für eine Theorie des Anschlags können dieselben nicht in Betracht kommen, da es sich um Einflüsse zweiter Ordnung handelt; ihre theoretische Untersuchung dürfte ziemlich schwierig sein, und es ist aus mehreren Gründen wahrscheinlich, dass sie unter der Schwelle des Wahrnehmbaren bleiben."⁶⁷⁾

VII "Many pianists are firmly convinced that they can put a vast amount of expression into the striking of a single note of the piano: some claim to be able to draw the whole gamut of emotion out of a single key. In reply, the untemperamental scientist points out that, in striking a single note, the pianist has only one variable at his disposal - the force with which he strikes the key; this determines the velocity with which the hammer hits the wires, and once this is settled, all the rest follows automatically. It is not, however, a legitimate inference that single notes can differ only in loudness; differences in the strength of striking will also produce a difference in the proportions in which the various

harmonics enter, and this will naturally alter the emotional quality of the note. For instance, very hard striking increases the relative proportion of the upper harmonics and so imparts dissonance and harshness as well as mere loudness. It seems natural to associate the resulting sound with anger, disappointment or despair. But it remains true that all the shades of tone which the pianist can get out of one note form one linear sequence only this corresponding to the different speeds with which the hammer can strike the wire and it is quite certain that the human emotions cannot be placed in a single linear sequence. Also it seems clear that, so long as he confines himself to striking single notes, the greatest virtuoso has no greater range of effects at his disposal than the child strumming at its five-finger exercises."⁶⁸⁾

VIII "Zur Frage, ob es möglich ist, beim Flügel oder beim Klavier die Klangfarbe eines einzelnen Klanges durch die Art des Anschlags zu beeinflussen, ohne gleichzeitig die Schallintensität zu ändern, ist noch zu bemerken, dass dies (entgegen vielfach vorherrschenden Ansichten) nach den physikalischen Gegebenheiten nicht möglich ist. Der Hammer fliegt - sich selbst überlassen - gegen die Saite. Irgendwelche Beeinflussungsmöglichkeiten durch den Spieler liegen nach dem Abschnellen der Taste nicht mehr vor. Dieser physikalischen Tatsache entgegenstehende auf Grund subjektiver Wahrnehmung gezogene Schlüsse sind Selbsttäuschungen, die vielleicht auf der Beobachtung des bereits erwähnten eigenartigen Fluktuierens beim Abklingvorgang beruhen."⁶⁹⁾

Der einzige, der wirklich experimentierte, war Ortmann. Er kam zu dem Schluss:

IX "What we actually do, then, when playing the piano, is to produce sounds of various pitch, intensity, and duration. Nothing more."⁷⁰⁾

Hinsichtlich des Dämpfers folgert Reeder übereinstimmend:

X "The function of the damper, therefore, is to stop tone."⁷¹⁾

4.16 Aus den Zitaten 4.10 - 4.15 erhellt, dass man zwar an eine klangliche Beeinflussung des Klavierspiels durch den Dämpfer glaubte, aber bei der Suche nach Gründen dafür nicht über Vermutungen hinauskam, dass man ferner unter dem Druck naturwissenschaftlicher Zeugnisse Untersuchungen zum Thema aufgab, da die subjektiven Wahrnehmungen für Selbsttäuschungen gehalten wurden. Leider bezeugt das Zitat 4.15/I richtig, dass man sich allgemein den Ansichten 4.15/ I - X angeschlossen habe. Das ist bedauerlich und sicherlich ein Grund dafür, dass ausgerechnet die Klavierspieler in den Testen der vorliegenden Arbeit nicht als die natürlicherweise besten Kenner des Klavierklanges abschneiden. Wenn man seit etwa zwei Generationen lehrt, dass es keine klanglichen Unterschiede ausser laut und leise gäbe, dann hören viele Spieler eben nur noch laut und leise. Es wäre einer Untersuchung wert festzustellen, was unter diesen Umständen die Komponisten hören. H. Hering schreibt dazu:

"Die Gemeinsamkeit der genannten Erscheinungen wird aber weit überschritten, wenn andererseits aus dem Verlangen der jüngsten Klavierliteratur heraus eine Wiedergabe gefordert wird, die aus der rythmischen Profilierung die Tonsubstanz des Klaviers bis in ihre stumpfste Realität hinein jeglicher Farbe wie individueller Sensibilität entkleidet. In dieser Härte, die das Klavier in Schlagzeugnähe rückt, hat die rückläufige Tendenz der Gegenwart gegenüber der Individuation der vorangegangenen Epoche ihren prägnantesten Ausdruck gefunden."⁷²⁾

4.20 Subjektive Beobachtungen

Während die vorliegende Arbeit zustande kam, ergaben sich Gelegenheiten zu subjektiven Beobachtungen, von denen einige mitgeteilt werden sollen. Das lässt sich hier um so eher rechtfertigen, als schon im Titel der Übergang von der objektiven zur subjektiven Erfahrungswelt angekündigt wird. Es gibt immerhin subjektive Beobachtungen über den Klavierklang, über die man sich mit anderen verständigen kann. Der Erfolg ist, dass man nach einiger Erfahrung eine allgemeine Verbreitung dieser Beobachtungen für möglich hält. Obwohl nicht objektiv dargestellt, ist deren Mitteilung und Bestätigung als Ausblick wertvoll, besonders wenn sie in einem - einstweilen vermuteten - kausalen Zusammenhang mit dem experimentellen Befund stehen.

4.21 Ein Blick auf die Pegelpartituren dieser Arbeit überrascht zunächst. Man ist gewöhnt, den Klavierton als eine homogene Einheit zu denken. Das Linienspiel der Pegelkurven passt schlecht zu dieser Vorstellung. Es ist aber nur eine

Frage der Aufmerksamkeit, ob man die einzelnen Kurven hört oder nicht, ähnlich wie man bei einem Orchesterstück erst mit Übung lernt, den einzelnen Instrumenten der Partitur durch das Klanggewoge zu folgen. Hier wie dort gibt es Begabungsunterschiede im analytischen Hören. Manche hören von vorneherein viele Einzelheiten und Zusammenhänge, die andere nie oder nur nach angestrengtester Übung hören. Ein Beispiel dafür ist der Test mit den Musikstudenten.

In der Pegelpartitur ist nur die Verlaufsform, nicht die relative Lautstärke der Pegelkurven zu sehen. Tatsächlich gibt es in verschiedenen Oktavlagen kennzeichnende Obertöne, die leichter herausgehört werden können als andere und somit relativ lauter sind. Diese Töne gehören meist zu den Kurven mit dem besonders flachen Abfall. Wie rememberlich, sind solche Kurven bei den Beschreibungen der Pegelpartituren wiederholt aufgefallen. Es ist ferner aufgefallen, dass dieselben Kurven auch bei gedämpften Klängen den relativ flachsten Abfall haben. Subjektiv wird das so wahrgenommen, dass die kennzeichnenden Obertöne bei ungedämpften Klängen erst nach Sekunden, bei gedämpften jedoch praktisch sofort hervortreten.

Die Obertöne liegen alle im Frequenzgebiet zwischen 200 und 600 Hz. Für die Oktave von A,, bis A, (27,5 - 55 Hz) sind das Partialtöne der Ordnungszahlen 12 - 24. Nach Intervallen sind es Septimen, Nonen, Sexten und Terzen. Oftmals ist es ein Obertonpaar, von denen zunächst ein Partner und später der andere Partner hörbar hervortritt. Die Reihenfolge bleibt dieselbe beim gedämpften Ton. Vielfach tritt bei der ersten flüchtigen Dämpfung der erste Partner auf, während der zweite

erst dazu kommt, nachdem ein zweites mal gedämpft worden ist. Wegen des Dämpferaufsatzeffekts lässt man beim Spiel die Dämpfung nicht gerne längere Zeit in derselben Stellung.

In den nächst höheren Oktaven fallen die Ordnungszahlen der prominenten Partialtöne zunächst auf 6 - 12, dann 3 - 6 und schliesslich auf 2 und 1. Sobald die Grundtöne in die ursprüngliche Obertonregion fallen, findet ein Umschwung statt. Höhere Obertöne, die bis dahin zwar vorhanden aber nicht prominent waren, werden nun bedeutend. Sie stammen aus dem Bereich 1,2 - 2,4 kHz. In die Höhe haben die Saiten keinen Dämpfer mehr. Das Obertongefüge wird daher weitgehend unabhängig vom Grundton.

Im Klavier ist also eine klangliche Einrichtung enthalten, die der repetierenden Mixtur bei der Orgel entspricht. Die subjektive Beobachtung zeigt, dass die Hörbarkeit dieser Mixtur und deren Zusammenstellung in Grenzen, aber deutlich, durch den Gebrauch der Dämpfung veränderlich ist.

4.22 Obwohl der Mixturklang des Klaviertones durch die Dämpfung hervorgehoben wird, ist deren auffälligste Wirkung etwas anderes. Bei der Dynamik des Tonbandgerätes war vom Nutzbereich und von Störbereichen die Rede. Beim Klavierspiel gibt es etwas ähnliches. Für jeden neuen Anschlag ist der bereits vorhandene Klang eine Störung mit einem gewissen Störpegel. Liegt der neue Anschlag dynamisch weit über dem Störpegel, so erklingt er subjektiv deutlich. Erhebt er sich aber nur unbedeutend über den Störpegel, so klingt er verwaschen. Auf diesen Klang bezieht sich die abwertende Bemerkung

Reeders:

"Many musicians consider pedalling to be the chief means by which the quality of tone may be varied.....yet they do not change the relative prominence of partial-tones of the string struck, or the fundamental characteristics of the tone produced, they merely reinforce and somewhat diffuse the penetrating quality of a well-focused tone."⁷¹⁾

(Die Bemerkung steht übrigens bezüglich der relativen Prominenz gewisser Teiltöne im Widerspruch zum Befund dieser Arbeit.)

Den Abstand des Nutzsignals vom Störpegel nennt man Störabstand. Die Regelung des Störabstandes und die damit verbundene subjektive Verbesserung der Klangqualität ist also die Hauptwirkung der Dämpfung. Schon der damit verbundene, stärkere Pegelabfall der Klänge wird u.a. als Änderung der Klangfarbe aufgefasst, wie der Studententest zeigt. Vollends der dazukommende Eindruck der Deutlichkeit jedes neuen Anschlags bewirkt, dass man tatsächlich bei einem dermassen kontrollierten Spiel glaubt, ein besseres Instrument zu hören.

Der Störabstand ist eine relative Grösse und hat nichts mit der musikalischen Dynamik im Sinne von forte und piano zu tun. Er hat aber mit dem Tempo des Stückes zu tun. Um denselben Störabstand bei schnelleren und langsameren Tonfolgen zu bewahren, muss man beim Allegro einen steileren Pegelabfall handhaben als beim Adagio. Beim Adagio kommt noch eine Beobachtung hinzu. Subjektiv werden Unterschiede in der gleichbleibenden Dämpfung nur bei direktem Vergleich wahrgenommen. Was jedoch jederzeit sofort auffällt, ist eine Ver-

änderung im Grad der Dämpfung. Der Adagioton klingt daher musikalisch spannungsreicher, wenn er mit allmählich zunehmender Steilheit des Abfalles soweit herabgedämpft wird, dass der nächste Ton mit dem gewünschten Störabstand erklingt.

Es versteht sich von selbst, dass es musikalische Situationen gibt, in denen ein verschleierter Klang erwünscht ist, sodass in diesen Fällen kein Gebrauch von einem grösseren Störabstand gemacht wird. Subjektiv klingen solche Stellen im forte hallig, sie lassen an grosse Säale oder Kirchen denken; im piano geben solche Stellen einen Eindruck von Entrückung, grosser Ferne. Sie wirken in beiden Fällen unpersönlich, während Stellen mit grösserem Störabstand näher, eindringlich, womöglich aufdringlich wirken.

4.23 Es scheint zwei subjektive Bewertungen über das Tonende zu geben. Die eine wertet, wann der Ton zum ersten mal gedämpft wird (1), die andere, wann der Ton tatsächlich verhallt (2). Die erste ist offenbar die einfachere. Die zweite tritt nur ein, wenn anfangs unmerklich gedämpft wird. Das Ohr folgt dem Ton dann buchstäblich ins Nichts. Es meldet erst das Tonende, wenn jeder Nachklang verhallt ist. Bei welchem Schwellwert das Ohr von (1) zu (2) überspringt, ist schwer festzustellen. Beispiele für beide Bewertungen zeigen die Abbildungen 10 - 29.

5.00 Zusammenfassung

Aus den Befunden der vorliegenden Arbeit folgt, dass der Spieler am Flügel über eine variable Dämpfung verfügt. Diese erlaubt ihm, den Ton hörbar in vierfacher Hinsicht abzuwandeln.

1.) Hinsichtlich der Dynamik. Er kann unabhängig vom Tempo des Stückes und von der musikalischen Dynamik einen grösseren oder kleineren "Störabstand" handhaben.

2.) Hinsichtlich des Spektrums. Da beim Dämpfen tiefere Frequenzbereiche eher als höhere betroffen werden, kann er die relativen Pegelverhältnisse im Spektrum ändern und den Ton subjektiv aufhellen.

3.) Hinsichtlich der Zeitgestalt. Er kann einen Knick in der Pegelkurve anbringen, einen gleichmässigen, gradlinigen Pegelabfall und einen zunehmend gedämpften, bogenförmigen Pegelabfall hervorbringen.

4.) Hinsichtlich der subjektiven Obertonstruktur. Er kann an sich vorhandene Obertöne subjektiv hörbar machen, indem er deren Frequenzbereiche von anderen Obertönen in unmittelbarer Nachbarschaft freimacht.

Aus den Untersuchungen geht allerdings ferner hervor, dass nicht alle Hörer die Abwandlungen des Klavierklanges durch die Dämpfung hören. Der Prozentsatz der von den Unterschieden angesprochenen Hörer ist jedoch gross genug, um eine

Berücksichtigung der Dämpfereffekte bei der Entwicklung einer individuellen Klavierspieltechnik zu rechtfertigen. Vortragbar ist die gesamte Klavierliteratur bereits mit einer Spieltechnik, die den Dämpfer nur gebraucht, um den Ton plötzlich auszulöschen. Es hängt daher vom Geschmack und von der Fertigkeit des Spielers ab, ob er sich zusätzlich der genannten Möglichkeiten der Dämpfung bedienen will.

Bedankungen.

Herrn Prof. Dr. J.J.A. van der Walt und Herrn Prof. Dr. J.F. de Beer sei vielmals für die Förderung der Arbeit durch ihr wohlwollendes Interesse und ihre fruchtbare Kritik gedankt.

Bei der Herstellung der Bänder und Analysen waren die folgenden Institute durch die Bereitstellung von Laboratorien und Apparaten beteiligt:

Die Technische Hochschule Aachen, verantwortlich: Prof. Dr. W. Janovski, Dipl.-Ing. P. Scherer; Die Nordwestdeutsche Musikakademie Detmold, verantwortlich : Prof. Dr. E. Thienhaus, H. Mühle; Der Rat für wissenschaftliche und technische Forschung Pretoria, verantwortlich: Dr. A. Burger, Dr. W. Keet.

Den genannten Instituten, vor allem aber den betroffenen Verantwortlichen sei besonders für die Bereitwilligkeit und Hilfsbereitschaft bei der Durchführung der Aufnahmen und Analysen gedankt.

Ein Wort des Dankes auch den Musikstudenten der Universitäten Pretoria und Potchefstroom. Organisatorische Vorbereitungen für die Tests wurden dankenswerterweise von Prof. Dr. J. Malan für Pretoria und Prof. Dr. J.J.A. van der Walt für Potchefstroom geleitet.

Herzlichen Dank ebenfalls den Mitgliedern des Lehrerkollegiums der Oberschule Oranje in Bloemfontein für die Mitwirkung am Lehrertest, dessen Durchführung die Rektorin, Frl. M.L. Spies, wohlwollend ermöglichte. Den Schülerinnen, die bei den Proberunden mitwirkten, sei besonders gedankt.

Die Bibliotheken der Universitäten Potchefstroom, Pretoria und Bloemfontein, die der W.N.N.R. Pretoria, die Bayrische Staatsbibliothek München und die Privatbibliothek H. Neupert in Bamberg standen dem Verfasser gastweise zur Verfügung und lieferten zuverlässig und zuvorkommend die Quellen. Herr Prof. Dr. K. von Delft übernahm freundlicherweise die Durchsicht des Manuskripts in sprachlicher Hinsicht während Frl. H.M. Jooste die Schreibmaschinenarbeit unermüdlich erledigte. Allen sei herzlich gedankt, vor allem aber meiner Frau, die es einzurichten wusste, dass immer ein stilles Studierzimmer bereitstand, dessen Ungestörtheit sie selbstlos verteidigte.

Q U E L L E N

- 1) K. Kützing, Das Wissenschaftliche der Forte - Piano -
baukunst, Leipzig 1844 S. 41/42
- 2) F. Trendelenburg, Einführung in die Akustik, Berlin
1961, S. 382. Vergl. auch W. Reichardt, Grund-
lagen der Elektroakustik, Leipzig 1960, S. 428
- 3) W. Reichardt, Grundlagen der Elektroakustik, 3. Aufl.
Leipzig 1960, S. 427
- 4) R. Thiele, Acustica 3, 1953, S. 291
- 5) E. Zwicker, Amplitudengang der nichtlinearen Verzerrungen
des Ohres, Akust. Beihefte 1955, H.1, S. 67
- 6) F. Winkel, Phänomene des musikalischen Hörens, Berlin-
Wunsiedel, 1960, S. 122
- 7) E. Trendelenburg, Einführung in die Akustik, Berlin
1960, S. 39
- 8) W. Reichardt, Grundlagen der Elektroakustik, Leipzig
1960, S. 190
- 9) K.H. Baer und H. Lauer, Die subjektive und objektive
Untersuchung der Übertragungsgüte neuzeitlicher
Mittelwellensender, N.W.D.R.-Mitt. 1953, Nr. 9/10,
S. 178
- 10) F. Winckel, Phänomene des musikalischen Hörens, Berlin,
1960, S. 128
- 11) R. Feldtkeller und E. Zwicker, Das Ohr als Nachrichten-
empfänger, Stuttgart 1956, S. 23
- 12) H.v. Helmholtz, Gelehrte Anz. Bayr. Akad. Wiss. 18
Junie 1859 - Die Lehre von den Tonempfindungen,
6. Auflage Braunschweig 1913, S. 168
- 13) F.A. Fischer, Grundzüge der Elektroakustik, Berlin 1959,
2. Auflage, S. 11
- 14) W. Reichardt, Grundlagen der Elektroakustik, Leipzig
1960, 3. Aufl., Tabelle 3.1
- 15) R. Feldkeller und E. Zwicker, Das Ohr als Nachrichten-
empfänger, Stuttgart 1956, S. 12
- 16) W. Lottermoser und Fr. J. Meyer, Verdeckungseffekt bei
Orgelspektren, Acustica 8, 1958, S. 398
- 17) H.-P. Seraphim, Untersuchungen über die Unterschieds-
schwelle exponentiellen Abklingens von Rausch-
bandimpulsen, Acustica 8, 1958, S. 280
- 18) H. Niese, Vorschlag über die Definition und Messung der
Deutlichkeit nach subjektiven Grundlagen, Hoch-
frequenztechn. und Elektroakustik, 65, 1956, S. 11

- 19) id. *ibid.*
- 20) K. Steudel, *Hochfrequenztechn. und Elektroakustik*, 1933, S. 616
- 21) F. Trendelenburg, E. Thienhaus und E. Franz, *Zur Klangwirkung von Klavichord, Cembalo und Flügel*, A.Z. 1940, S. 318
- 22) W. Kuhl, *Über Versuche zur Ermittlung der günstigsten Nachhallzeit grosser Musikstudios*, *Acustica*, 1954, S. 618
- 23) H. Niese, *Die Lautstärkeempfindung von rythmischen Geräuschen sehr geringer Periodizität*, *Hochfrequenztechn. und Elektroakustik*, 1958, S. 26
- 24) A. Seebeck, *Progg. Ann. d. Phys.* 53, 1841, S. 417
- 25) J.F. Schouten, *Proc. K. Ned. Akad. Wet.* 41, 1938, S. 1086 - *id.* *Proc. K. Ned. Akad. Wet.* 43, 1940, S. 356 - *id.* *Proc. K. Ned. Akad. Wet.* 43, 1940, S. 991
- 26) H. Duifhuis, *Audibility of High Harmonics in a Periodic Pulse*, *J.A.S.A.* 48, 1970, S. 888
- 27) J. Pfundner, *Über den Schlagton von Glocken*, *Acustica* 12, 1962, S. 153
- 28) E.D. Blackham, *The Physics of the Piano*, *Scientific American*, Dec. 1965, S. 95
- 29) F.H. Slaymaker, *Chords from Tones having Stretched Partial*, *J.A.S.A.* 47, 1970, S. 1569
- 30) R.W. Young, *Inharmonicity of Piano Strings*, *Acustica* 4, 1954, S. 259 - H. Fletcher, E.D. Blackham, R. Stratton, *Quality of Piano Tones*, *J.A.S.A.* 34, 1962, S. 756
- 31) E. Caland, *Das künstlerische Klavierspiel in seinen physiologisch-physikalischen Vorgängen nebst Versuch einer praktischen Anleitung zur Ausnützung seiner Kraftquellen*, Magdeburg 1909, S. 46
- 32) L. Rieman, *Das Wesen des Klavierklanges*, Leipzig 1911, S. 215
- 33) C.A. Taylor, *The Physics of Musical Sounds*, London 1965, S. 175
- 34) H.C. Hart, M.W. Fuller und W.S. Lusby, *A Precision Study of Piano Touch and Tone*, *J.A.S.A.* 1934, S. 94
- 35) H. Fletcher, E.D. Blackham und R. Stratton, *Quality of Piano Tones*, *J.A.S.A.*, 1962, S. 749
- 36) L. Riemann, *Das Wesen des Klavierklanges*, Leipzig 1911, S. 215
- 37) A. Marmotel, *Histoire du Piano*, Paris, 1885, S. 357
- 38) Ein Ausspruch Chopins über den Pedalgebrauch, überliefert in : C. Piron, *L'Art du Piano*, Paris 1949, S. 32

- 39) C.G. Hamilton, Touch and Expression in Piano Playing, Boston, 1927, S. 63
- 40) A. Foldes, Keys to the Keyboard, 1951, Oxford Un., S. 15
- 41) Y. Bowen, Pedalling the Modern Pianoforte, London, 1936, S. 6
- 42) M. Hambourg, How to play the Piano, G.H. Doran, 1922, S. 84
- 43) W.B. White, The Human Element in Piano Tone Production, J.A.S.A 1930, S. 358
- 44) K. Leimer, Rhythmik-Dynamik, Pedal, Mainz, 1938, S. 66
- 45) F. Trendelenburg, E. Thienhaus und E. Franz, Zur Klangwirkung von Klavichord, Cembalo und Flügel, A.Z. 1940, S. 323
- 46) E. Schmitz, Klavier, Klaviermusik und Klavierspiel, Leipzig, 1919, S. 95
- 47) R.M. Breithaupt, Die Natürliche Klaviertechnik, Berlin, 1905, S. 296
- 48) W. Georgii, Klavierspielerbüchlein, Freiburg i.Br. 1953, S. 50
- 49) id. ibid. S. 42
- 50) S. Harrison, Piano Technique, London 1953, S. 68
- 51) B. Reeder, The Singing Touch, New York, 1943, S. 38
- 52) Y. Bowen, Pedalling the Modern Pianoforte, London, 1936, S. 6
- 53) J. Pembauer, Von der Poesie des Klavierspiels, Köln, 1915, S. 40
- 54) F.A. Steinhausen, Die physiologischen Fehler und die Umgestaltung der Klaviertechnik, Leipzig, 1905, S. 24
- 55) M. Jaëll, Der Anschlag, Leipzig 1901 (nach R.M. Breithaupt, Natürliche Klaviertechnik, Leipzig, 1905, S. 195)
- 56) E. Caland, Das künstlerische Klavierspiel, Magdeburg, 2/ 1919, S. 46
- 57) E. Schmitz, Klavier, Klaviermusik und Klavierspiel, Leipzig, 1919, S. 92
- 58) R.M. Breithaupt, Natürliche Klaviertechnik, Leipzig, 1905, S. 218
- 59) F. Winckel, Phänomene des musikalischen Hörens, Berlin - Wunsiedel, 1960, S. 84
- 60) L. Schauffler, Piano Technic, Myth or Science, Chicago, S. 18

- 61) F. Trendelenburg, E. Thienhaus und E. Franz, Zur Klangwirkung von Klavichord, Cembalo und Flügel, A.Z. 1940, S. 318/19
- 62) id. ibid.
- 63) R.M. Breithaupt, Natürliche Klaviertechnik, Leipzig, 1905, S. 190
- 64) Geheimrat Prof. Dr. Rubens, in E. Tetzl, Das Problem der modernen Klaviertechnik, Leipzig, 1916, S. 172
- 65) M. Planck, ibid.
- 66) Dr. Krigar-Menzel, ibid.
- 67) Dr. Rieke, ibid.
- 68) J. Jeans, Science and Music, Cambridge, 1947, S. 99
- 69) F. Trendelenburg, Einführung in die Akustik, Berlin 1961, S. 161
- 70) O. Ortmann, The Physical Basis of Piano Touch and Tone, New York, 1925, S. 171
- 71) B. Reeder, The Singing Touch, New York, S. 19
- 72) H. Hering, MGG 7, Kassel 1958, S. 1183