

Messungen der Klangeinsatzdauer bei Musikinstrumenten

von A. MELKA

Tesla-Forschungsinstitut für Nachrichtentechnik, Prag, Tschechoslowakei

Zusammenfassung

Es wurde die Dauer der Anfangstransienten der Klänge der Oktavenreihe C bei 24 verschiedenen Musikinstrumenten in Abhängigkeit von der Spieldynamik und von der Klangeinsatzhärte gemessen. Die Klangeinsatzdauer wurde für die Schlaginstrumentengruppe in einer anderen Weise als für die übrigen Instrumente definiert. Die durch Messung ermittelten Angaben zeigen die Abhängigkeit der Klangeinsatzdauer von der Art des Instruments, von der Tonhöhe des gespielten Klanges und von der Härte des Klangeinsatzes; bei Schlaginstrumenten wurde außerdem die Abhängigkeit der Klangeinsatzdauer von der Spieldynamik festgestellt. Die ermittelten Werte liegen im Bereich von einigen ms bei Schlaginstrumenten bis zu einigen hundert ms bei Streichinstrumenten. Die festgestellten Ergebnisse wurden mit den Ergebnissen der Arbeit [2] verglichen.

Measurements of Tone-Rise Time of Musical Instruments

Summary

Attack-transient-duration measurements of the octave row C tones were carried out with 24 different musical instruments with respect to the dependence on the loudness of the play and on the way the player is starting the tone. For the percussive instruments the tone-rise time was defined in a different way than for the other kinds of instruments. The values obtained from measurements show the dependence of the tone-rise time on the kind of the instrument, on the tonal pitch of the tone played, and on the way the player is starting the tone. Moreover, in the case of the percussive instruments the tone-rise time dependence on the loudness of the play was found. The values ascertained by measurement are in the range from several ms with percussive instruments up to hundreds ms with the bowedstring instruments. The results were compared with results of the work [2].

Mesure de la durée d'attaque d'un ton dans les instruments de musique

Sommaire

On a mesuré la durée des attaques transitoires de la série des tons C pour 24 instruments de musique différents en fonction de la dynamique du jeu et de la rigueur d'attaque du ton. On a défini la durée d'attaque d'un ton pour le groupe des instruments à percussion d'une autre façon que pour les autres instruments. Les données obtenues par les mesures indiquent que la durée d'attaque du ton dépend du type d'instrument, de la hauteur du ton joué et de la rigueur d'attaque du ton; on constate que dans les instruments à percussion la durée d'attaque du ton dépend de la dynamique du jeu. Les valeurs mesurées restent dans le domaine de quelques ms pour les instruments à percussion et s'élèvent à quelques centaines de ms pour les instruments à cordes. Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux de l'étude [2].

1. Einleitung

Dem Studium der Dauer der Anfangstransienten der natürlichen Musiksignale wird in der Musikakustik immer größere Aufmerksamkeit gewidmet, in der letzten Zeit namentlich im Zusammenhang mit der Problematik der synthetischen Musik. Durch den Vergleich der Angaben der verschiedenen Forscher von BACKHAUS [1] bis zu LUCE und CLARK [2] über die Dauer der Anfangstransienten bei den einfachen Klängen stellen wir fest, daß die Ergebnisse dieser Arbeiten ziemlich verschieden sind. Für die Anlaufdauer des Tones a^1 bei der Geige gibt zum Beispiel BACKHAUS in [3] den Wert 160 ms, in [1] 80 bis 120 ms an, LUCE und CLARK [2] geben ungefähr 85 ms an; FLETCHER [4] hat für den Nachbarklang g^1 die Werte 70 bis 200 ms festgestellt.

Diese große Verschiedenartigkeit der Angaben ist teilweise durch den verschiedenen Zugang der einzelnen Autoren zu der Lösung des Problems, namentlich durch die Unterschiede in der Definitionsweise der Klangeinsatzdauer, verursacht. Die Hauptursache muß man aber wahrscheinlich darin suchen, daß einige den Charakter und die Dauer der Anfangstransienten beeinflussende Faktoren (wie zum Beispiel die Qualität des Instrumentes, die Befähigung des Spielers, die Spielweise, besonders die Klangeinsatzweise und anderes) sehr schwierig objektiv definiert und kontrolliert werden können.

Bei der Untersuchung der psychoakustischen Bedeutung der Anfangstransienten ist es darum gewöhnlich notwendig, zuerst eine objektive Analyse des Klangmaterials, mit dem wir arbeiten wollen, durchzuführen. Das war auch das Hauptmotiv dieser Arbeit. Es war nicht das Ziel, die durchschnitt-

lichen statistischen Werte der Klangeinsatzdauer aus der großen Komplexität der Signale zu bestimmen, sondern die konkreten Werte für eine gewisse begrenzte Zahl der nach den im voraus festgesetzten subjektiven Kriterien aufgenommenen und ausgewählten Signale festzustellen.

2. Auswahl und Aufnahmen von musikalischen Klängen

Diese Arbeit untersucht die Dauer der Anfangstransienten bei 24 verschiedenen im symphonischen Orchester gebrauchten Musikinstrumenten. Neben den gebräuchlichsten waren auch die weniger üblichen Musikinstrumente ausgewählt, die aber von dem Standpunkt der Ausgleichsvorgänge beim Klangeinsatz interessant sind. Einige der benutzten Musikinstrumente gehören zu den anerkanntesten Erzeugnissen ihrer Art (Guarneri-Geige, Steinway-Konzertflügel und andere).

Die Musiker wurden unter Mitarbeit des Dirigenten aus den Mitgliedern des Orchesters der Tschechischen Philharmonie ausgewählt. Wir bemühten uns, solche Musiker zu gewinnen, die auch mit dem Spiel in kleineren Kammermusikgemeinschaften vertraut sind, Solisten, Konzertmeister und andere.

Der ganze Arbeitsgang bei der Aufnahme der Klänge wurde den Interessen des weiteren psychoakustischen Studiums dieser Signale untergeordnet. Wir wählten solche Bedingungen und solche technischen Mittel, die sich der bei Musikaufnahmen von hoher Qualität gewohnten Praxis so weit wie möglich nähern. Dem entsprach die Wahl des Aufnahmeortes, die Stellung des Mikrophons und des Spielers sowie die Qualität der Aufnahmeapparatur.

Die Aufnahmen wurden im großen Saal des Künstlerhauses in Prag gemacht; diesen Saal benutzt die Grammophongesellschaft SUPRAPHON als Aufnahmestudio. Bei der Stellung des Spielers und des Mikrophons bemühten wir uns um größte Beschränkung des Einflusses der störenden Reflexionen. Der Musiker wurde mit seinem Instrument an den Rand des Podiums gestellt; das Mikrophon stand im Saal in einer Entfernung von ungefähr 2,5 m von dem Instrument, das heißt im Direktfeld, in der Richtung der maximalen Instrumentenausstrahlung. Bei drei Instrumenten wurde eine größere Entfernung (3,5 m) von dem Mikrophon gewählt; es drohte die Gefahr der nichtlinearen Verzerrung durch die Mikrophonübersteuerung.

Die Aufnahmeanlage bestand aus dem Kondensatormikrophon AKG C24 (es wurde nur ein System mit Nierenrichtcharakteristik benutzt), aus dem Tonmischpult DGG M12 und aus dem Studio-Stereo-Magnettongerät TELEFUNKEN M 10. Das monophone Signal wurde auf beide Spuren des Ma-

gnettonbandes AGFA PER 555 gleichzeitig aufgenommen.

Die Wahl des Klangmaterials bei den Instrumenten mit definierbarer Tonhöhe beschränkten wir nur auf die Klänge der Oktavenreihe C, die in drei dynamischen Stufen *pp*, *mf*, *ff* gespielt wurden. Bei einigen Instrumenten konnte man bei den obersten Tönen des Instrumentenklangumfanges nur zwei dynamische Stufen unterscheiden.

Was die Klanglänge betrifft, wurde jedes Signal auf zweierlei Art gespielt; als ein sehr kurzer Klang, mit einer sechzehntel Note vorgeschrieben, und als ein mittellanger Klang, mit einer viertel Note vorgeschrieben. Bei den Streichinstrumenten wurden außer dem Spiel mit dem Bogen kurze Klänge auch pizzicato gespielt.

Bei der Wahl der Klangeinsatzweise waren wir bestrebt, daß die Musiker beide Grenzfälle ausdrucksvoll unterscheiden: den sehr allmählichen „weichen“ Klangeinsatz von dem extrem heftigen „harten“ Klangeinsatz. Der weiche Klangeinsatz wurde immer bei den langen Klängen, der harte Klangeinsatz bei den kurzen gefordert. Diese Verbindung der beiden Kriterien haben wir wegen der Zeitersparnis gewählt. Dazu berechtigte uns die statistisch überzeugende Feststellung der Arbeit [2], daß die Klangeinsatzdauer bei der sonst gleichen Generationsweise von der Klanglänge nicht signifikant abhängig ist. Die angeführten Kombinationen der Klanglänge und der Einsatzhärte haben wir gewählt, um den Musikern eine deutliche Unterscheidung der beiden Einsatzweisen zu erleichtern. Bei den Schlaginstrumenten haben wir uns auf den einfachen Schlag beschränkt; die Schlaghärte beeinflussten wir durch die Wahl der Klöppel aus Material verschiedener Härte.

Bei allen Klängen wurde das Spiel ohne Vibrato vorgeschrieben. Die Erzeugung des Klanges kam immer aus dem Ruhezustand des Instrumentes.

Wir waren bestrebt, alle Forderungen an die Musiker in der gewohnten Musikterminologie auszudrücken, damit die Musiker durch die technischen Standpunkte so wenig wie möglich beeinflusst würden. Aus diesem Grund wurde der ganze Aufnahmegang in Zusammenarbeit mit dem Dirigenten vorbereitet und für jedes von den 24 Instrumenten in der Partitur ausgedrückt. Die mündlichen Anweisungen für die Musiker beschränkten wir nur auf die Instruktion über die Stellung des Instrumentes angesichts des Mikrophons und auf die Aufforderung zur ausdrucksvollen Unterscheidung der beiden Grenzfälle der Klangeinsatzweise.

Jeder Klang wurde bei der Aufnahme mindestens fünfmal wiederholt; dabei achteten wir darauf, daß der Anfang des Klanges mit dem Nachhall des vorangehenden Klanges nicht überdeckt wurde.

Die Aufnahmen wurden dann in einem akustisch entsprechenden Hörraum vor einer Hörergruppe reproduziert. Mitglieder dieser Gruppe waren der Dirigent, der Tonregisseur, die zu den betreffenden Instrumenten gehörigen Musiker und der Verfasser dieses Artikels. Als Ergebnis der Beurteilung dieser Hörergruppe wurde für jeden Fall ein Klang für die weitere Untersuchung ausgewählt.

3. Durchführung der Messungen

Die Dauer der Anfangstransienten wurde für jeden der gewählten Klänge aus dem vergrößerten Oszillogramm des Signalzeitverlaufs graphisch festgestellt.

Für die optische Aufzeichnung des Zeitverlaufs der untersuchten Signale benutzten wir den Zweistrahl-Oszillographen DISA 51 BOO und die Filmkamera COSSOR 1428 Mk IIB mit einer kontinuierlichen Bewegung des Films. Das Ausgangssignal des Magnetongerätes wurde auf den Eingang einer vertikalen Oszillographenverstärker gegeben. Bei der ausgeschalteten Zeitbasis des Oszillographen wurde dann die vertikale Bewegung des Strahles auf dem Lichtschirm auf das sich gleichmäßig bewegende Filmband aufgenommen. Der zweite Strahl wurde durch die Spannung aus dem eingebauten Rechteck-Pulsgenerator intensitätsmäßig moduliert; damit haben wir unter der Aufzeichnung jedes Signals einen genauen Zeitmaßstab von 20 ms gewonnen, der zugleich die Kontrolle der Gleichmäßigkeit des Filmtransportes ermöglichte.

Die technischen Bedingungen bei der Auf- und Abnahme der Signale und bei Vergrößerung der Oszillogramme wurden so gewählt, daß der Anfang bei jedem Signal in den Grenzen des dynamischen Umfanges der benutzten elektroakustischen Einrichtung (ungefähr 56 dB) mit genügender Genauigkeit festgestellt werden kann.

Große Aufmerksamkeit mußte der Definitionsweise der Klangeinsatzdauer gewidmet werden.

Die Bestimmung des Anfangszeitpunktes des Klanganlaufs war mit keinen besonderen Schwierigkeiten verbunden. Dabei haben wir in die Klangeinsatzdauer grundsätzlich auch den Teil des Signals einbezogen, der noch keinen Toncharakter hat, der aber mit der Klangentstehung unmittelbar zusammenhängt (die Berührung des Bogens an der Saite, der Anschlag des Fingers auf die Taste und ähnliches).

Das Problem der Definition des Endzeitpunktes des Klanganlaufs erwies sich als bedeutend schwieriger. In manchen Fällen ist es nicht passend, diesen Augenblick als t_{\max} , das heißt als die Zeit, in der die Signalamplitude maximal ist, zu definieren, besonders bei den langen Klängen der Streichinstru-

mente und einiger Blasinstrumente. Die Amplitude dieser Signale wächst gewöhnlich auf den maximalen Wert sehr langsam an, so daß die Feststellung des Zeitpunktes t_{\max} nur ungenau sein kann (siehe Fig. 1). Auch die Anwendung der in der Impuls-

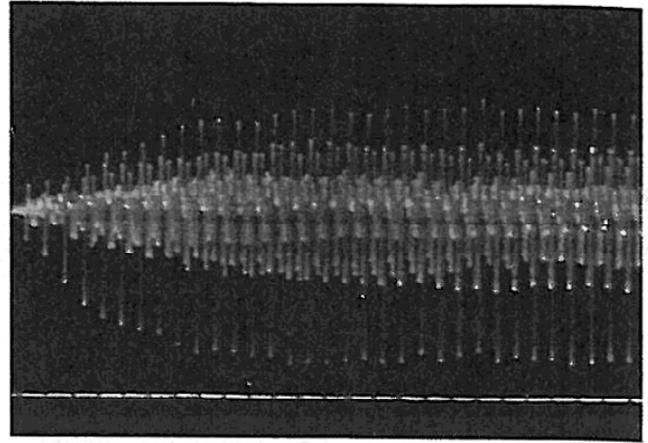


Fig. 1. Oszillogramm des langsamen Klanganlaufs beim Fagott (C, *pp*, weicher Einsatz).

meßtechnik benutzten Definitionsart für die Impulsanstiegszeit (das heißt die Zeit, in der die Spannung von 10% bis 90% des Endwertes ansteigt), zeigte sich in manchen Fällen als unzuverlässig für unsere Signale, da die Amplitudenmodulationstiefe der Hüllkurve des Signals in der Umgebung der maximalen Amplitude oft den Wert von 10% übersteigt (siehe Fig. 2).

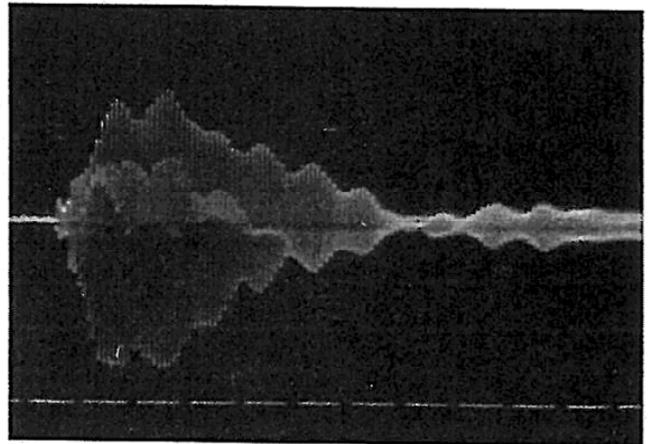


Fig. 2. Oszillogramm des Klanganlaufs bei der Posaune (c^2 , *pp*, harter Einsatz).

Fast für alle Signale der Nichtperkussionsinstrumente zeigte sich als genügend die von LUCE und CLARK in der Arbeit [2] benutzte Definitionsweise: Die Klangeinsatzdauer t_E ist hier als Zeitintervall $t_E = t_{-3} - t_0$ zwischen dem Klanganfangspunkt t_0 und dem Zeitpunkt t_{-3} definiert, in dem die Hüllkurve des Signals gerade den um 3 dB kleineren Wert annimmt, als der Wert im „stationären“ Zustand beträgt. Wir benutzten diese Definition auch in unserer Arbeit; dies ermöglicht einen Vergleich

unserer Ergebnisse mit den Ergebnissen von [2]. Die Bestimmungswiese der Klangeinsatzdauer wird an dem Beispiel des Flötenklanges in Fig. 3 illustriert. Um den Einfluß der Asymmetrie der Hüllkurve einiger Signale auf die Genauigkeit der Feststellung t_E auszuschließen, zogen wir immer den Doppelwert der Amplitude ab, das heißt die Entfernung zwischen beiden Hüllkurven, wie es aus der Figur deutlich wird.

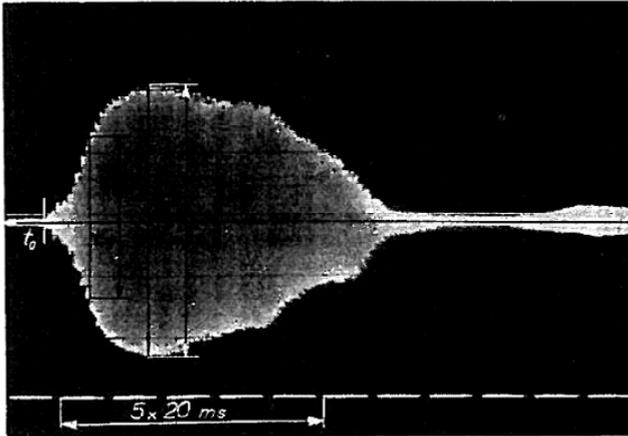


Fig. 3. Oscillogramm des Klanganlaufs bei der Flöte (c^3 , ff , harter Einsatz). Beispiel für die Bestimmung der Klangeinsatzdauer $t_E = t_{-3} - t_0$.

Für die Signale der Schlaginstrumentengruppe ist diese Definitionsweise der Klangeinsatzdauer nicht besonders passend. Der Klanganlauf ist hier in der Regel sehr heftig, mit einem ausdrucksvollen scharfen Maximum, während der Zeitpunkt t_{-3} nur sehr ungenau festgestellt werden kann. Aus diesem Grunde benutzen wir für die Schlaginstrumente eine abweichende Definitionsweise: die Klangeinsatzdauer t'_E definieren wir als das Zeitintervall $t'_E = t_{\max} - t_0$ zwischen dem Klanganfangszeitpunkt t_0 und dem Zeitpunkt t_{\max} , in dem die Amplitude des Signals den maximalen Wert erreicht (siehe Fig. 4).

Der Zeitverlauf der Klänge der gezupften und der geschlagenen Saiteninstrumente (in unserem Fall Harfe, pizzicato bei den Streichinstrumenten, Konzertflügel) ähnelt mit seinem Charakter in einigen Fällen mehr den Signalen der Schlaginstrumentengruppe (siehe das Beispiel des Pizzicato der Geige in Fig. 5). Trotzdem haben wir auch bei diesen Signalen in dem Bestreben nach einer einheitlichen Beurteilung der ganzen Saiteninstrumentengruppe die erste Definitionsweise der Klangeinsatzdauer bevorzugt.

Die Anwendung von zwei verschiedenen Definitionen der Klangeinsatzdauer löst aber nicht alle Probleme, die mit der Messung der Klangeinsatzdauer verbunden sind. Die Schwierigkeiten entstehen zum Beispiel bei den Signalen der Schlaginstrumen-

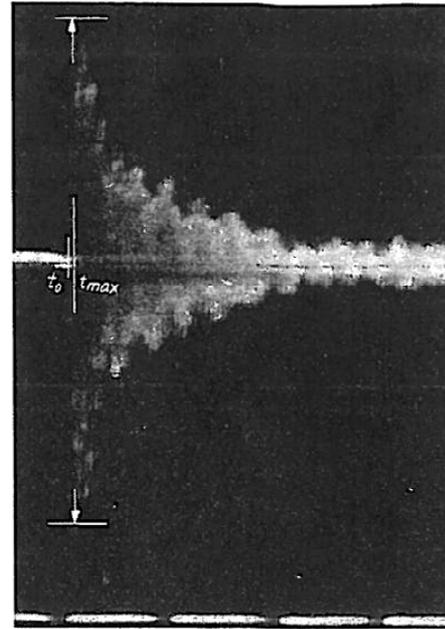


Fig. 4. Oscillogramm des Klanganlaufs beim Xylophon (c^3 , mf , Schlag mit dem harten Klöppel). Beispiel für die Bestimmung der Klangeinsatzdauer $t'_E = t_{\max} - t_0$.

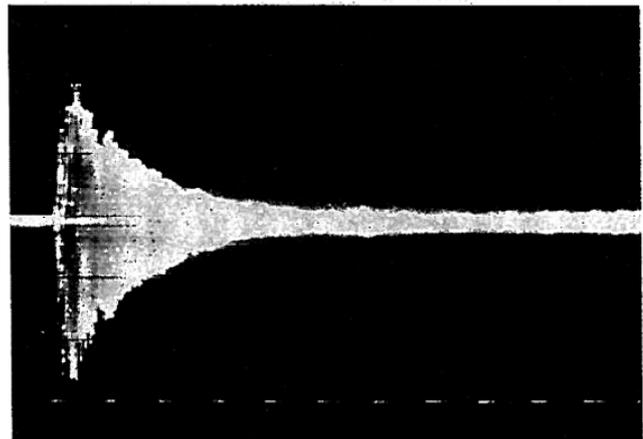


Fig. 5. Oscillogramm des Klanganlaufs bei der Geige beim Pizzicatospiel (c^3 , mf).

te mit unbestimmter Tonhöhe, die oft mehr einen Geräusch- als einen Toncharakter haben. Problematisch ist auch die Bestimmung von t_E bei einigen Klängen der Blechblasinstrumente, für die die besonderen Ausgleichsvorgänge charakteristisch sind, die von STRONG und CLARK [5] „blips“ genannt werden (siehe das Beispiel in Fig. 6), und die sich manchmal während des Klanganlaufs wiederholen. Nähern sich die Amplitudenwerte dieser „blips“ dem Werte der Amplitude in stationärem Zustand, so entstehen Schwierigkeiten bei der Bestimmung von t_{\max} und auch t_{-3} (siehe Fig. 7).

In diesen und ähnlichen Fällen waren wir bestrebt, die Klangeinsatzdauer für die Klänge desselben Instruments möglichst einheitlich zu definieren. Gerade bei diesen Signalen stellte sich die gra-

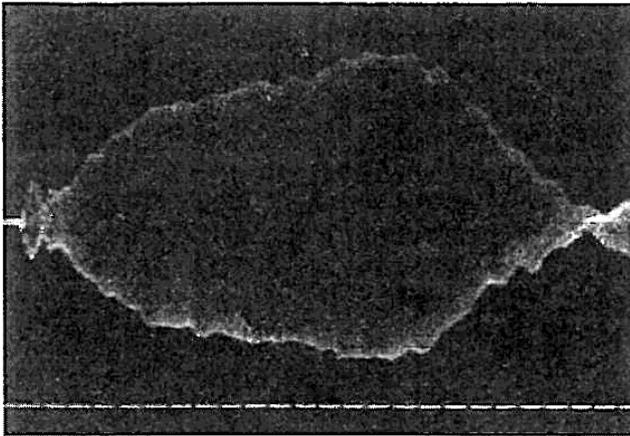


Fig. 6. Oszillogramm des Klanganlaufs beim Horn (c^2 , mf , weicher Einsatz).

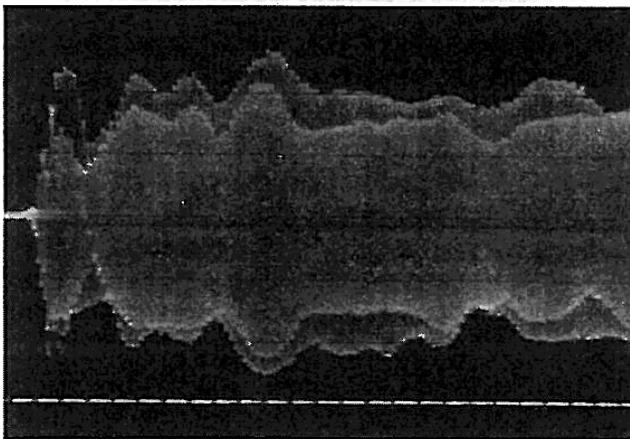


Fig. 7. Oszillogramm des Klanganlaufs beim Fagott (c^1 , ff , weicher Einsatz).

phische Meßmethode als sehr vorteilhaft heraus, auch wenn diese freilich viel zeitraubender ist als zum Beispiel die in [2] benutzte Methode.

4. Meßergebnisse

Unsere Meßergebnisse haben wir graphisch als die Abhängigkeit der gemessenen Klangeinsatzdauer t_E beziehungsweise t'_E von der Tonhöhe in den Figuren 8 und 9 für Streichinstrumente, in der Fig. 10 für geschlagene und gezupfte Saiteninstrumente, in der Fig. 11 für Holzblasinstrumente, in der Fig. 12 für Blechblasinstrumente und in der Fig. 13 für Schlaginstrumente dargestellt. Weil wir nur die Töne der Oktavenreihe C untersuchten, sind in diesen graphischen Darstellungen die einem Instrument angehörigen Punkte durch eine gebrochene Linie miteinander verbunden. Wie die genannten graphischen Darstellungen zeigen, ist die Klangeinsatzdauer von der Art des Instrumentes und der Tonhöhe stark abhängig.

Bei den Schlaginstrumenten zeigte sich eine markante Abhängigkeit der Klangeinsatzdauer von der Spieldynamik: fast bei allen gemessenen Signalen

nimmt die Klangeinsatzdauer mit wachsender Dynamik ab. Darum sind in Fig. 13 die Werte t'_E für verschiedene dynamische Angaben (pp , mf , ff), wie auch die arithmetischen Durchschnitte von diesen Werten für jeden Klang bezeichnet.

Bei anderen untersuchten Instrumenten wurde keine bedeutende Abhängigkeit von t_E von der Spieldynamik festgestellt. Zu der gleichen Erkenntnis sind bei den Nichtperkussionsinstrumenten die Autoren der Arbeit [2] auch für grundsätzlich umfangreichere Signalkomplexe gelangt. Darum sind in den graphischen Darstellungen für diese Instrumente für jede Tonhöhe nur die durchschnittlichen Werte der Klangeinsatzdauer von allen dynamischen Spielweisen angegeben.

Die Ergebnisse zeigten, daß man eine sehr markante Abhängigkeit der Klangeinsatzdauer von der Klangeinsatzhärte bei allen Instrumenten voraussetzen konnte. Bei den Klängen mit einem sehr harten Einsatz wurde eine bedeutend kürzere Klangeinsatzdauer festgestellt als bei sehr weich einsetzenden Klängen. Bei dem Pizzicatoispiel auf Streichinstrumenten wurden viel kleinere Werte t_E als bei den gleichen mit dem Bogen gespielten Klängen gemessen. Aus diesen Gründen haben wir die Verläufe von t_E für die verschiedenen Spielweisen in besondere graphische Darstellungen eingetragen.

Weil die von uns gemessenen Werte nur einen verhältnismäßig engen Komplex der Signale repräsentieren, halten wir es für zweckmäßig, diese mit den Ergebnissen der Arbeit [2], die die Klangeinsatzdauer bei den Nichtperkussionsinstrumenten studierte, zu vergleichen. Der Vergleich wurde durch die gleiche Definitionsweise der Klangeinsatzdauer in beiden Arbeiten erleichtert. In einigen Aspekten unterscheiden sich beide Arbeiten grundsätzlich, was bei dem Vergleich der Ergebnisse zu beachten ist.

Die in der Arbeit [2] festgestellte Abhängigkeit der Klangeinsatzdauer von der Tonhöhe ist für Streichinstrumente in Fig. 9b, für Holzblasinstrumente in Fig. 11c und für Blechblasinstrumente in Fig. 12c bildlich dargestellt. Die Kurven repräsentieren den ganzen, nach chromatischen Halbtönen abgestuften Klangumfang der Instrumente. Jeder Punkt dieser Kurven veranschaulicht den durchschnittlichen Wert der Klangeinsatzdauer des gegebenen Klages von drei dynamischen Spielweisen — pp , mf , ff (bei mf wurde die Spielweise vibrato sowie non vibrato erfaßt mit je drei bis vier verschiedenen Klanglängen: kurz, mittelkurz, mittellang und lang) —, wobei zu jedem untersuchten Instrumententyp je zwei Musiker verschiedene Instrumente spielten.

Vergleichen wir jetzt die resultierenden Verläufe beider Arbeiten, vorläufig jedoch ohne Rücksicht auf den Maßstab der Zeitachse.

Bei den Streichinstrumenten (Fig. 8 und 9), besonders bei dem weichen Einsatz, ist die Übereinstimmung in dem Grundcharakter der verglichenen Verläufe verhältnismäßig gut, sogar einschließlich

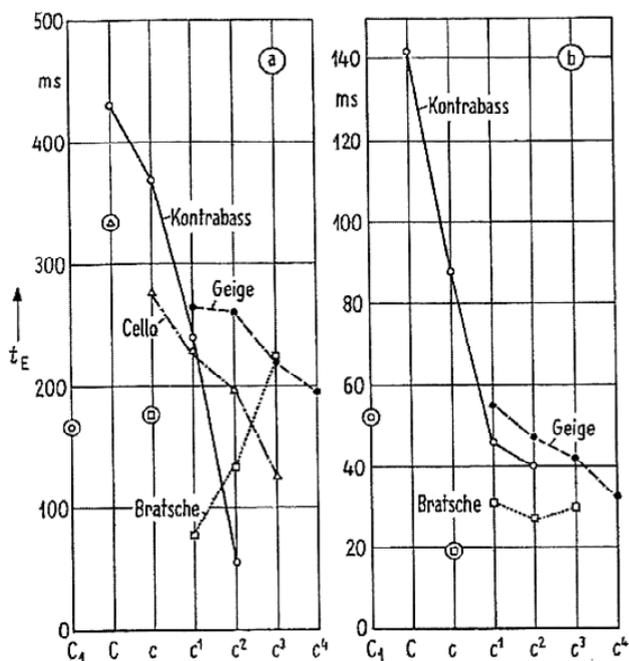


Fig. 8. Abhängigkeit der Klangeinsatzdauer von der Tonhöhe bei Streichinstrumenten
(a) bei weichem Einsatz,
(b) bei hartem Einsatz.
○ Leere Saite.

der Kurve der Bratsche, die sich von dem Verlauf der anderen Instrumente dieser Gruppe markant unterscheidet. Zu Unregelmäßigkeiten kommt es bei den an der leeren Saite gespielten Klängen, mit denen sich die Verfasser der Arbeit [2] jedoch nicht beschäftigen. Einen abweichenden Charakter haben

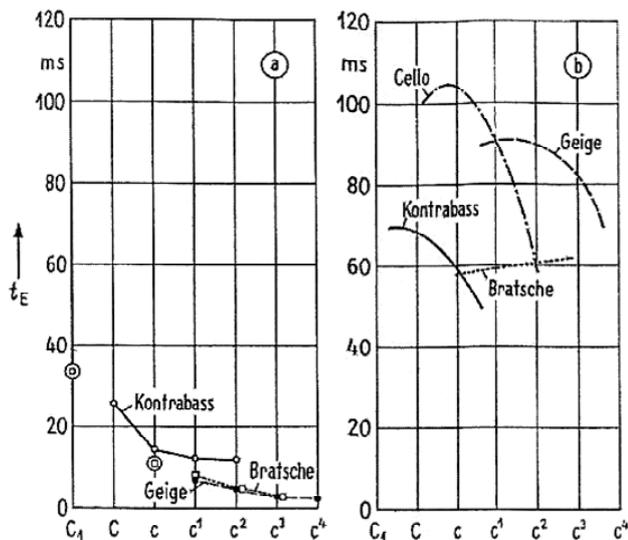


Fig. 9. Abhängigkeit der Klangeinsatzdauer von der Tonhöhe bei Streichinstrumenten
(a) beim Pizzicato-Spiel,
(b) nach [2].
○ Leere Saite.

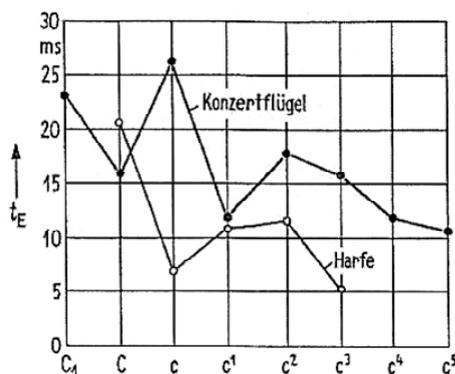


Fig. 10. Abhängigkeit der Klangeinsatzdauer von der Tonhöhe bei gezupften und geschlagenen Saiteninstrumenten bei hartem Einsatz.

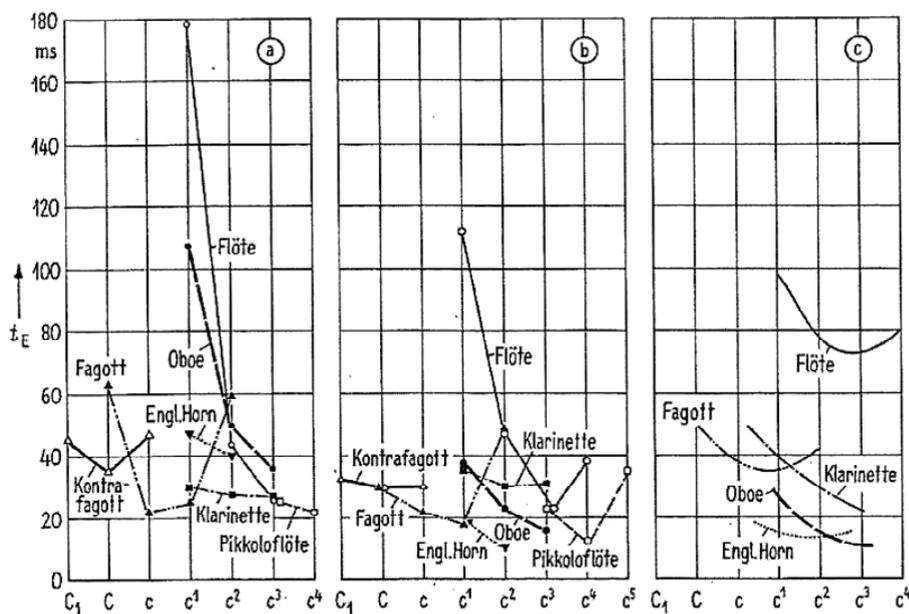


Fig. 11. Abhängigkeit der Klangeinsatzdauer von der Tonhöhe bei Holzblasinstrumenten
(a) bei weichem Einsatz,
(b) bei hartem Einsatz,
(c) nach [2].

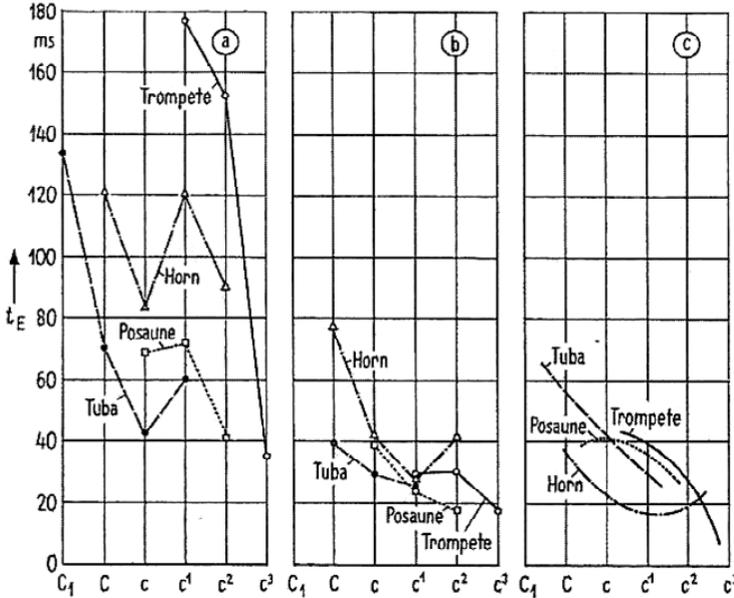


Fig. 12. Abhängigkeit der Klangeinsatzdauer von der Tonhöhe bei Blechblasinstrumenten (a) bei weichem Einsatz, (b) bei hartem Einsatz, (c) nach [2].

auch die Verläufe von t_E für pizzicato (Fig. 9 a) im Gegensatz zu denen, die beim Spiel mit dem Bogen ermittelt wurden; deutlich wird es durch die stark abweichende Klangbildungsart in beiden Fällen verursacht.

Bedeutende Ähnlichkeit ist auch beim Vergleich der Verläufe der Holzblasinstrumente zu beobachten (Fig. 11). Interessant ist hier die Anknüpfung der Verläufe von Flöte und Pikkoloflöte bei c^3 , sowohl bei weichem, als auch bei hartem Einsatz.

Größere Unterschiede in der Form der verglichenen Verläufe stellen wir bei den Blechblasinstrumenten fest (Fig. 12), ganz besonders beim Horn. Die Ursache liegt wahrscheinlich im spezifischen Charakter des Verlaufs der Anfangstransienten bei dieser Instrumentengruppe und in den damit zusammenhängenden Schwierigkeiten bei der Feststellung der Klangeinsatzdauer, wie wir sie schon in Abschnitt 3 erwähnten.

Einen Vergleich für die geschlagenen und gezupften Saiteninstrumente kann man nicht vornehmen, da diese Instrumente in der Arbeit [2] nicht untersucht wurden. Die bei der Harfe und besonders beim Konzertflügel ermittelten Werte von t_E (Fig. 10) sind in bedeutendem Maße inhomogen, obwohl die Streuungen nicht größer als bei den übrigen Instrumenten waren. Die wahrscheinliche Ursache dieser Erscheinung ist im sogenannten Chor-Effekt zu suchen, der durch die gleichzeitige Teilnahme einiger Saiten an der Realisierung des Klanges entsteht. Es geht hier also um besonders komplizierte Klangstrukturen, deren Studium eine selbständige, bisher ganz offene Problematik bedeutet [5].

Bei den Schlaginstrumenten (Fig. 13), wo der Vergleich mit [2] auch nicht möglich ist, ist die schon erwähnte Abhängigkeit der Klangeinsatzdauer

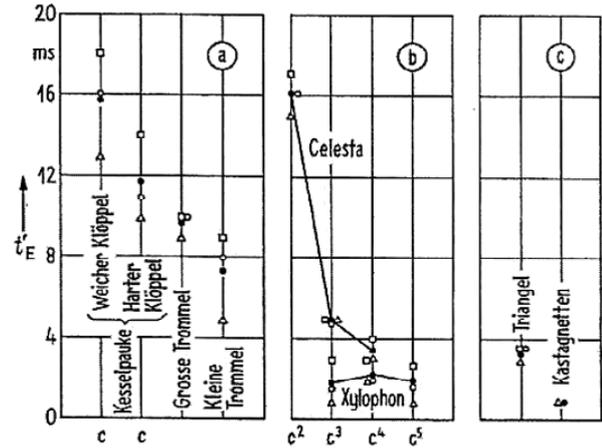


Fig. 13. Die Klangeinsatzdauer (a) bei Membranophonen, (b) bei Idiophonen mit bestimmter Tonhöhe, (c) bei Idiophonen mit unbestimmter Tonhöhe.

- *pp*,
- *mf*,
- △ *ff*,
- Durchschnitt.

von der Spieldynamik bemerkenswert. Sie läßt sich offenbar in der Art erklären, daß bei dieser Klangbildungsart mit der Spieldynamik sich gleichzeitig auch die Einsatzhärte ändert: bei *ff* ist der Schlag härter und schneller als bei *mf* oder *pp*.

Vergleichen wir die Ergebnisse beider Arbeiten noch einmal, in diesem Fall mit Berücksichtigung des Zeitmaßes, stellen wir fest, daß sich die konkreten numerischen Werte von t_E der beiden Arbeiten sehr wesentlich voneinander unterscheiden.

Die Hauptursache dieser Unterschiedlichkeit ist ohne Zweifel das abweichende Vorgehen der beiden Arbeiten bei dem Instruieren der Musiker. Während bei unserer Arbeit die Musiker zielbewußt da-

zu geleitet wurden, bei dem Spiel zwei extreme Klangeinsatzweisen ausdrucksvoll zu unterscheiden, wurde den Musikern in [2] keine Anweisung bezüglich des Klangeinsatzes gegeben. Man kann also voraussetzen, daß die Musiker in [2] eine mittelharte Einsatzweise zwischen beiden Extremen nach eigener Erwägung gewählt haben. Daraus folgt, wenn wir keine weiteren möglichen Ursachen erwägen, daß die für die Instrumente des gleichen Typs in [2] festgestellten Kurven immer zwischen den Verläufen liegen sollten, die wir für beide Grenzfälle des Klangeinsatzes gemessen haben.

Durch den Vergleich der Verläufe von t_E für einzelne Instrumente ist diese Erwägung im ganzen bestätigt. In allen Fällen (mit Ausnahme von einigen wenigen Punkten bei den Verläufen für Flöte, Klarinette und Fagott) sind die bei den weich eingesetzten Klängen gemessenen Werte der Klangeinsatzdauer größer als die entsprechenden Werte der Arbeit [2]. Auch für die meisten Töne mit hartem Einsatz sind unsere Werte t_E kleiner als die entsprechenden Werte aus [2], auch wenn es hierbei mehrere Ausnahmen gibt (Kontrabaß, Oboe, Horn, teilweise auch Klarinette, Englisch Horn und Trompete). Wir können sehen, daß die Abweichungen fast ausschließlich bei den Blasinstrumenten erscheinen, wo wir mit einer besonders großen Abhängigkeit der Klangeinsatzdauer von der Person des Musikers rechnen müssen, wie es die Arbeit [2] andeutet. Dies ist (zusammen mit der auch in [2] festgestellten signifikanten Abhängigkeit von t_E von dem konkret benutzten Instrument) deutlich die zweite Hauptursache der Unterschiede in den Ergebnissen der beiden verglichenen Arbeiten.

In der Tabelle I ist für jedes Instrument und für jede Spielweise die durchschnittliche Klangeinsatzdauer \bar{t}_E und die durchschnittliche Standard-Abweichung \bar{s} angegeben, die den arithmetischen Durchschnitt der Klangeinsatzdauer t_E beziehungsweise t'_E und der Standard-Abweichung s für alle untersuchten Tonhöhen und dynamischen Spielstufen darstellen. Für den Vergleich sind in der Tafel für jedes Instrument und für jede benutzte Klanglänge die entsprechenden aus der Arbeit [2] übernommenen Werte dargestellt. Auch wenn man zu diesem Arbeitsgang Vorbehalte haben kann, bietet er doch eine weitere Möglichkeit zum Vergleich der Ergebnisse der beiden Arbeiten und ermöglicht die Klassifizierung der Instrumente je nach Länge der durchschnittlichen Klangeinsatzdauer.

Aus der Tabelle kann man sehen, daß mit Ausnahme von zwei Instrumenten (Oboe, Klarinette) unsere Standard-Abweichungen kleiner als die entsprechenden Abweichungen in der Arbeit [2] sind. Das wird ohne Zweifel vor allem durch die größere Anzahl der Faktoren verursacht, die die Variabili-

tät der Klangeinsatzdauer bei der Arbeit [2] beeinflussen. In gewissem Maße kann man vielleicht aus der Größe \bar{s} auch auf die Qualität des Spiels und die Qualität der Auswahl der Signale in den einzelnen Fällen schließen.

Versuchen wir nun die Instrumente nach der Größe der durchschnittlichen Klangeinsatzdauer t_E zusammenzureihen.

Die kürzeste Klangeinsatzdauer wurde bei den Schlaginstrumenten in dieser Reihenfolge gemessen (von den kleinsten Werten von t_E aufwärts): Kastagnetten, Xylophon, Triangel, kleine Trommel, Celesta, große Trommel, Kesselpauke. Die durchschnittliche Klangeinsatzdauer liegt hier im Bereich von 1 bis 16 ms.

An diese Instrumentengruppe knüpfen eng die Saiteninstrumente an, bei denen der Klang durch Anzupfen (pizzicato bei den Streichinstrumenten 15 bis 21 ms, Harfe 21 ms) oder durch den Schlag (Konzertflügel 29 ms) entsteht.

Es folgt die Holzblasinstrumentengruppe (durchschnittliche Werte von 14 bis 56 ms bei hartem Einsatz und 24 bis 83 ms bei weichem Einsatz), weiter die Blechblasinstrumentengruppe (10 bis 20 ms bei hartem Einsatz, 61 bis 122 ms bei weichem Einsatz). Es ist schwierig, die Reihenfolge der einzelnen Instrumente bei diesen Gruppen festzustellen, mit Rücksicht auf die großen Unterschiede der Klangeinsatzdauer bei verschieden hartem Klangeinsatz, die bei den einzelnen Instrumenten unterschiedlich sind.

Noch ausdrucksvoller sind diese Unterschiede bei der Gruppe der Streichinstrumente, bei denen wir die allgemein längsten Klangeinsatzdauern festgestellt haben (27 bis 74 ms bei hartem Einsatz, 151 bis 255 ms bei weichem Einsatz). Mit Ausnahme der Bratsche, deren atypisches Verhalten wir schon erwähnten, wächst hier die Klangeinsatzdauer mit der Größe des Instruments.

Die angegebene Reihenfolge stimmt mit der in [2] festgestellten Reihenfolge der Nichtperkussionsinstrumente überein, bis auf die Flöte, bei der wir bei den höheren Klängen für beide Fälle des Klangeinsatzes viel kleinere Werte von t_E ermittelt haben, als die Verfasser [2] angeben.

5. Schlußbemerkung

Die Arbeit hat auf einige Schwierigkeiten hingewiesen, die mit dem Suchen einer einheitlichen Definition der Klangeinsatzdauer der Anfangstransienten für die Klänge verschiedener Instrumente verbunden sind, und hat einen Versuch gemacht, diese Schwierigkeiten durch die Wahl von zwei verschiedenen Definitionen der Klangeinsatzdauer bei den Perkussions- und Nichtperkussionsinstrumenten zu lösen.

Die Ergebnisse der Arbeit erweitern die bisherigen Kenntnisse über die Dauer der Anfangstransienten der einfachen Musiksignale, die bisher in größtem Umfang in der Arbeit [2] veröffentlicht worden waren, um Angaben für einige weitere Instrumente (Pikkoloflöte, Kontrafagott) und Instrumentengruppen (Schlaginstrumente, geschlagene und gezupfte Saiteninstrumente).

Die gemessenen Werte bestätigen die Schlußfolgerungen der Verfasser von [2] über die signifikante Abhängigkeit der Klangeinsatzdauer von dem Instrumententyp und von der Tonhöhe bei den Nichtperkussionsinstrumenten und erweitern die Gültigkeit dieser Schlußfolgerungen auch auf weitere Instrumente.

Auch hat sich die Erkenntnis bestätigt, daß bei den Nichtperkussionsinstrumenten die Klangeinsatzdauer von der Dynamik des Spieles nicht bedeutend abhängig ist. Bei Schlaginstrumenten wurde umgekehrt ein deutlicher Zusammenhang der Klangeinsatzdauer mit dem Zeichen für die Dynamik festgestellt; mit der wachsenden Spieldynamik verkürzt sich die Klangeinsatzdauer.

Zum Unterschied zu den bisher bekannten Arbeiten ermittelten wir die Klangeinsatzdauer bei verschiedenen harten Klangeinsatzweisen. Die Ergebnisse beweisen, daß der Musiker durch die Wahl der verschiedenen Einsatzhärtestufen die Dauer der Anfangstransienten sehr wesentlich beeinflussen kann. Bei extrem hartem Einsatz wurde eine bis mehrfach kürzere Klangeinsatzdauer als bei sehr weichem Einsatz gemessen.

Die Größe der festgestellten Klangeinsatzdauer bewegt sich für den untersuchten Komplex der 24 Instrumente in dem Bereiche von drei Größenordnungen: von einigen Millisekunden bis zu einigen hundert Millisekunden.

Nach der durchschnittlichen Klangeinsatzdauer der Anfangstransienten wurde diese Reihenfolge

der Instrumentengruppen festgestellt: Schlaginstrumente (kürzester Anlauf), gezupfte und geschlagene Saiteninstrumente, Holzblasinstrumente, Blechblasinstrumente und Streichinstrumente (längster Anlauf).

Die Ergebnisse der Arbeit scheinen anzudeuten, daß man bei entsprechender Instruierung der Musiker durch die Methode einer kritischen subjektiven Auswahl auch aus dem nicht besonders umfangreichen Klangmaterial ein verhältnismäßig repräsentatives Muster der Signale gewinnen kann, das zum Studium des Charakters der Anfangstransienten geeignet ist.

Zum Schluß betrachtet es der Verfasser als seine angenehme Pflicht, allen Mitgliedern des Orchesters der Tschechischen Philharmonie, die sich an der Aufnahme und an der Beurteilung des Klangmaterials beteiligten, zu danken. Insbesondere gilt der Dank Herrn F. BURDA, dem Tonregisseur der Firma SUPRAPHON, für die zahlreichen Ratschläge und für seine freundliche Mitarbeit bei den Aufnahmen.

(Eingegangen am 3. Juli 1969.)

Literatur

- [1] BACKHAUS, H., Über die Bedeutung der Ausgleichsvorgänge in der Akustik. Z. techn. Phys. 13 [1932], 31.
- [2] LUCE, D., und CLARK, M., Durations of Attack Transients of Nonpercussive Orchestral Instruments. J. Audio Eng. Soc. 13 [1965], 194.
- [3] BACKHAUS, H., Über Ausgleichsvorgänge an Streichinstrumenten. Z. techn. Phys. 18 [1937], 98.
- [4] FLETCHER, H., BLACKHAM, E. D., und GEERTSEN, O. N., Quality of Violin, Viola, Cello and Bass-Viol Tones. J. Acoust. Soc. Amer. 37 [1965], 851.
- [5] STRONG, W., und CLARK, M., Synthesis of Wind-Instrument Tones. J. Acoust. Soc. Amer. 41 [1967], 39.