

DER "AKUSTISCHE BASS" VON ORGELN

E. Terhardt und M. Seewann

Lehrstuhl für Elektroakustik der Technischen Universität München

1. Einleitung

Bei Pfeifenorgeln wird seit langer Zeit von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, einen Baßton dadurch besonders tief erscheinen zu lassen, daß man ihn einen weiteren, höheren Ton im Quintabstand hinzufügt. Dadurch wird der Höreindruck erzeugt, daß der Baßton eine Oktave tiefer sei als der Frequenz bzw. der Pfeifenlänge des tieferen der beiden erklingenden Töne entspricht. Der solcherart erzielte Effekt wird als "akustischer Baß" bezeichnet. Die bisher einzige in der Fachliteratur dafür zu findende Erklärung besteht in der Annahme, daß infolge sehr großer Schalldruckamplituden an den Orgelpfeifen nichtlineare Verzerrungen zur Bildung eines Differenztones tiefer Frequenz führen, dessen Tonhöhe dem "akustischen Baß" entspräche (vgl. /1/). Uns sind jedoch keine systematischen Untersuchungen darüber bekannt, welche Amplitude derartige Differenz-töne tatsächlich aufweisen, ob dieselben überhaupt hörbar sind, und, falls dies zuträfe, welche Rolle sie bei der Tonhöhenwahrnehmung spielen. Physikalische sowie psychoakustische Überlegungen lassen es als sehr unwahrscheinlich erscheinen, daß die genannte Erklärung zutrifft: Wegen der tiefen Lage der in Frage kommenden Differenz-töne können dieselben nicht mit ausreichender Amplitude abgestrahlt werden, um überhaupt hörbar zu sein. Weit plausibler ist die Annahme, daß es sich beim "akustischen Baß" um eine schwach ausgeprägte Virtuelle Tonhöhe /2/ handelt. Um diese Annahme zu prüfen, haben wir an der Orgel der Münchner Paulskirche sechs Testklänge auf Tonband aufgenommen und damit Hörversuche durchgeführt, sowie ihre Virtuellen Tonhöhen mittels des früher beschriebenen Verfahrens /3/ bestimmt.

Die sechs Testklänge hatten ein- und denselben nominellen musikalischen Notenwert, nämlich denjenigen des "großen" A (nominelle Frequenz 110 Hz). Drei von ihnen wurden mittels je einer einzigen Pfeife der Register "Prinzipal", "Subbaß" und "Posaune" realisiert; sie stellen demnach "normale" Baßtöne dar. Die drei übrigen Klänge wurden durch Hinzunahme der Oberquint (obertonarmes Register) zu den vorgenannten Tönen erzeugt; sie können als typische Beispiele "akustischer Bässe" angesehen werden. Der Frequenzgang der Aufnahmeapparat-ur wurde besonders daraufhin kontrolliert, daß auch eventuell vorhandene Differenz-töne tiefer Frequenz erfaßt werden konnten. Der Mikrofonabstand von den Orgelpfeifen betrug etwa 5 m. Der Ton des Registers "Posaune" hat ein Amplitudenspektrum großer Bandbreite; die Amplitude der Grundschiwingung ist stark (ca. 30 dB) gegenüber der Maximalamplitude reduziert. Der Ton des Prinzipalregisters besitzt ebenfalls zahlreiche Harmonische, jedoch mit stärkerem Amplitudenabfall nach hohen Frequenzen; die Amplitude der Grundschiwingung ist nur wenig geringer als diejenige der zweiten Harmonischen. Der Ton des Subbaßregisters weist einen starken Amplitudenabfall nach hohen Frequenzen auf; die Amplitude der Grundschiwingung dominiert. Fig. 1 zeigt als Beispiele die Amplitudenspektren des Prinzipaltones allein (oben) und desselben, mit der Oberquint kombinierten To-

nes (unten). Der in den Spektren gewählte Maximalpegel von 70 dB entspricht ungefähr dem im Hörversuch eingestellten sowie dem bei der Tonhöhenberechnung angenommenen Schallpegel. In Fig.1 ist erkennbar, daß sowohl beim "reinen" Prinzipalton (oben) als auch beim Zweiklang (unten) unterhalb der nominellen Grundfrequenz von 110 Hz, das heißt, bei etwa 55 Hz ein schwach ausgeprägtes, relativ breites Maximum der Amplitudendichte auftritt, dessen Höhe etwa 30 dB unter dem Maximalpegel liegt. Es handelt sich dabei im wesentlichen um "akustischen Brumm", das heißt, tieffrequente Geräusche der elektrischen Windpumpe der Orgel im Bereich der Netzfrequenz. Da dieser Spektralanteil in beiden Fällen ungefähr gleich stark ist, kann angenommen werden, daß im Quintzweiklang kein Differenzton nennenswerter Stärke vorhanden war.

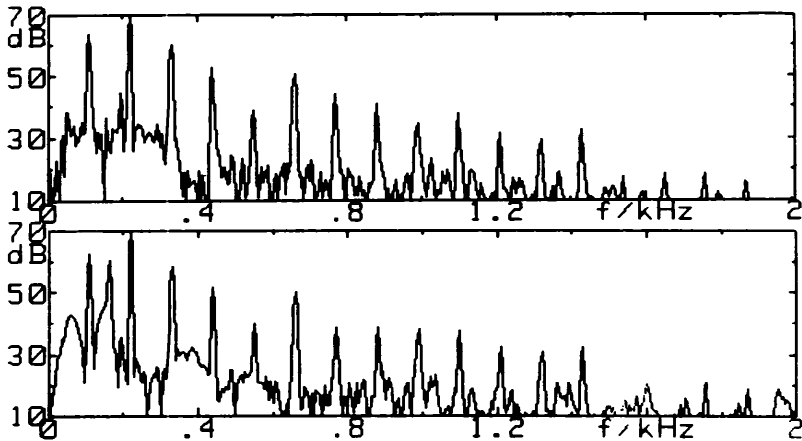


Fig.1. FFT-Spektren des Prinzipaltones (oben) und des mit dem Quintregister gemischten Prinzipaltones (unten). Hanningfenster 200 ms.

2. Hörvergleich

Die genannten sechs Testschalle wurden bei einer Dauer von je 1s auf einem Tonband paarweise und in zufälliger Reihenfolge kombiniert, einschließlich der Paare identischer Schalle. Die Pause zwischen den Testklängen eines Paares war 1s lang, und nach jeweils 2s wurde das Paar einmal wiederholt. Nach weiteren 3s wurde das nächste Paar wiedergegeben, und so fort. Jedes der 36 Klangpaare war auf dem Testtonband fünf mal in zufälliger Folge vorhanden. Die Darbietung erfolgte diotisch über Kopfhörer, wobei mittels eines Lautheitsanalysators die Lautheit auf 8 sone abgeglichen war. Elf Versuchspersonen nahmen teil. Sie hatten die Aufgabe, jeweils denjenigen der beiden Klänge eines Paares zu bezeichnen, welcher den tieferen Baßeindruck hervorrief (eine dritte Antwort war nicht zugelassen). Weil in den 36 Klangpaaren jeder Einzelklang insgesamt 12 mal enthalten war, beträgt die maximal mögliche Anzahl von "Bevorzungen" eines be-

stimten Klanges im Sinne eines tieferen Baßeindrucks $12 \times 5 \times 11 = 660$. Bezieht man die Anzahl der tatsächlich beobachteten "Bevorzugen" auf diesen Wert, so erhält man die in Tab.I angegebenen relativen Häufigkeiten. Mit ihrer Hilfe wurden die sechs Klänge in eine Rangfolge gebracht, so daß der am häufigsten als tiefer bezeichnete an erster Stelle steht, und so fort. Auf den ersten Blick ist erkennbar, daß hinsichtlich des Baßeindrucks deutliche Unterschiede zwischen den Klängen bestehen, obwohl deren nominelle Grundfrequenz ein- und dieselbe ist. Weiter zeigt sich, daß die Quintkombinationen nicht durchweg den stärksten Baßeindruck hervorrufen: Der Subbaßton allein hat offenbar eine stärkere Baßwirkung als die beiden "akustischen Bässe" (Prinzipal+Quint) und (Posaune+Quint). Daraus ist zu schließen, daß die durch die Quintkombination herbeigeführte Baßwirkung nur recht subtil sein kann; dies entspricht vollkommen dem subjektiven Höreindruck. Andererseits zeigt Tab.I, daß in der Rangfolge (Subbaß+Quint) vor Subbaß, (Prinzipal+Quint) vor Prinzipal, und (Posaune+Quint) vor Posaune stehen. Das heißt, die Quintkombination erzeugt in allen drei Fällen eine tiefere Baßwirkung als das Grundregister allein.

TESTSCHALL A $\hat{=}$ 110 Hz	E X P E R I M E N T		B E R E C H N U N G			
	relat. Häufigkeit "tiefer"	Rangfolge	Tonhöhengewicht			Rangfolge
			$\hat{=}$ 110 Hz	$\hat{=}$ 55 Hz	Diff.	
Subbaß+Qu.	0,84	1	0,23	0,23	0	1
Subbaß	0,68	2	0,53	0,26	0,27	3
Prinzip.+Qu.	0,58	3	0,72	0,32	0,40	4
Posaune+Qu.	0,45	4	0,69	0,45	0,24	2
Prinzipal	0,32	5	1,02	0,47	0,55	5
Posaune	0,13	6	1,10	0,47	0,63	6

Tab.I. Ergebnisse des Hörexperimentes und der Tonhöhenberechnungen

3. Tonhöhenberechnungen

Die geschilderten Ergebnisse des Hörversuchs können auf Grund der psychoakustisch evidenten Tatsache verstanden werden, daß die Tonhöhe eines komplexen (also auch eines musikalischen) Tones stets mehrdeutig ist, und zwar insbesondere hinsichtlich ihrer Oktavlage. Jeder der drei untersuchten Registertöne allein ruft deshalb nicht nur eine Tonhöhe hervor, welche seiner Grundfrequenz entspricht, sondern unter anderem eine weitere, welche eine Oktave darunter liegt. Die erstere Tonhöhe ist lediglich dadurch ausgezeichnet, daß sie die ausgeprägteste ist. Diesem Sachverhalt trägt das in /3/ beschriebene Tonhöhenberechnungsverfahren Rechnung, indem jeder aus dem Schallsignal ermittelten Tonhöhe ein Gewicht zugeordnet wird; diejenige mit dem größten Gewicht wird als die ausgeprägteste angesehen. Tab.I zeigt in den letzten vier Spalten die damit zur Grundfrequenz (110 Hz) bzw. zur Suboktave (55 Hz) gehörenden Tonhöhengewichte, deren Differenz, sowie die Rangfolge, welche man den Klängen auf Grund der Gewichts-differenz zuordnen kann. Diese Zuordnung geschieht mittels folgender Überlegung. Wenn die Gewichte der zu 110 Hz und 55 Hz gehörenden Tonhöhen gleich groß sind, wie dies bei (Subbaß+Quint) der Fall ist, dann sind beide Oktavlagen der Tonhöhenurteile gleich wahrscheinlich. Wenn dagegen das Gewicht

der Suboktave geringer ist als das des Grundtones (Dies ist bei allen übrigen Klängen der Fall), dann ist die Tendenz der Urteile zur tieferen Oktavlage entsprechend geringer einzuschätzen. Das heißt, daß ein Klang in der Rangfolge der Baßwirkung umso weiter unten steht, je größer die zugehörige Gewichts­differenz ist. Anstelle der Gewichts­differenz könnte man auch das Gewichts­verhältnis nehmen; dies würde am Ergebnis nichts wesentliches ändern.

Die derart ermittelte Rangfolge der sechs Klänge stimmt bis auf eine Vertauschung auf den Plätzen 2 bis 4 mit der experimentell ermittelten überein. Den Grad der Übereinstimmung beider Rangfolgen drückt man zweckmäßig durch den Spearman'schen Rangkorrelationskoeffizienten aus; er beträgt hier 0,83. Ein weiteres, sinnvoll erscheinendes Maß der Übereinstimmung zwischen experimentellen und theoretischen Ergebnissen ist der Korrelationskoeffizient gebildet aus den relativen Häufigkeiten und den Gewichts­differenzen; er beträgt $-0,90^1$. Die theoretische Rangfolge stimmt im übrigen mit der experimentell ermittelten auch insofern überein, als jeweils die mit einem bestimmten Register gebildete Quintkombination eine stärkere Baßwirkung hat als der betreffende Registerton allein: Auch in der theoretischen Rangfolge stehen (Subbaß+Quint) vor Subbaß, (Prinzipal+Quint) vor Prinzipal, und (Posaune+Quint) vor Posaune.

4. Zusammenfassung

Die Ergebnisse des Hörversuchs zeigen, daß der "akustische Baß" in der Tat im Sinne eines Höreindruckes nachweisbar ist. Jedoch wurde dabei offenbar, daß der Effekt recht subtiler Art ist und ebenso gut durch eine geeignete Registeränderung hervorgerufen werden kann. Die Tonhöhenberechnungen der Testklänge verdeutlichen, daß der Effekt durch die Theorie der Tonhöhenwahrnehmung ohne weiteres erklärt wird. Demnach handelt es sich beim "akustischen Baß" gerade nicht um ein akustisches Phänomen im heutigen Sinne des Wortes, sondern um ein hörpsychologisches. Es ist in der Psychoakustik als Virtuelle Tonhöhe bekannt.

Schrifttum

- /1/ Rieländer, M. (Hrsg.): Reallexikon der Akustik. Bochinsky, Frankfurt/M., 1982.
- /2/ Terhardt, E.: Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen. *Acustica* 26, 173-199 (1972).
- /3/ Terhardt, E., Stoll, G. und Seewann, M.: Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals. *J. Acoust. Soc. Am.* 71, 679-688 (1982).

1) Unter Berücksichtigung der Anzahl von 6 Datenpaaren bedeutet dies, daß ein Zusammenhang zwischen beiden Rangfolgen auf dem 0,1%-Niveau signifikant ist.