

# Einfluß der spektralen Energieverteilung auf die subjektive Beurteilung von Flügelklängen

M. N. Valenzuela, Fachgebiet Akustische Kommunikation, Techn. Univ. München

## Einleitung

Die Ergebnisse von Hörversuchen, bei denen Unähnlichkeitsmaße (subjektive Distanzen) zwischen einzelnen Tönen gleicher Tonlage (Untersuchungen getrennt für tiefe, mittlere und hohe Tonlage) von vier gleich großen Flügeln (b, i, s, y) verschiedener Hersteller bestimmt und anhand eines multidimensionalen Skalierungsalgorithmus in zweidimensionale geometrische Distanzmodelle umgerechnet wurden (vgl. DAGA 95, [1]), lassen einen Zusammenhang zwischen der Dimension 1 des entsprechenden Distanzmodells und dem groben Verlauf der zugehörigen Qualitätsbeurteilungen dieser Einzelklänge vermuten. Daher wurde durch weitere Hörversuche der in den drei Tonlagen sich andeutende Zusammenhang zwischen dieser Dimension und der spektralen Energieverteilung der Einzelklänge überprüft. Hierzu wurden für die drei Tonlagen getrennt Unähnlichkeitsmaße zwischen den ursprünglichen Tönen und einem entsprechend den ursprünglichen Tönen spektral modifizierten synthetischen Klang ermittelt, und daraus wiederum zweidimensionale geometrische Distanzmodelle berechnet.

## Distanzuntersuchungen

Für jede Tonlage wurde ein möglichst natürlich klingender, aber einfacher synthetischer Klang mit einem für jeden Partialton gleichbleibenden, bei logarithmischer Registrierung linear abfallenden Zeitverlauf erzeugt. Die Steigung des linearen Abfalls in der tiefen Tonlage (C2) beträgt in Anlehnung an die ursprünglichen Klänge -7 dB/s, in der mittleren Tonlage (C4) -10 dB/s. In der hohen Tonlage (C6) wurde ein aus zwei linear abfallenden Teilen unterschiedlicher Steigungen zusammengesetzter Zeitverlauf pro Partialton verwendet, da die Modellierung des Zeitverlaufs durch nur eine lineare Abklingphase bei der gewählten Tondauer von 2 Sekunden keinen ausreichend natürlichen Höreindruck liefert [2, 3]. Die Steigung des ersten linearen Abfalls beträgt entsprechend den ursprünglichen Klängen -73 dB/s, die Steigung des zweiten langsameren linearen Abfalls beträgt -15 dB/s. Zur Verbesserung des natürlichen Höreindrucks wurde den drei synthetischen Klängen außerdem noch ein aus jeweils einem der originalen Flügelklänge herausgefiltertes Anschlaggeräusch hinzugefügt, und die Inharmonizitätskoeffizienten entsprechend den Mittelwerten der zugehörigen Originalklänge gewählt. Durch das Angleichen der Gesamtenergie der einzelnen Partialtöne an die jeweils berechneten Werte der vier Originalklänge jeder Tonlage wurden vier synthetische Klänge je Tonlage erzeugt, die sich lediglich in der spektralen Energieverteilung unterscheiden. Zu jedem Originalklang (b, i, s, y) gibt es somit einen synthetischen Klang (Pb, Pi, Ps, Py), der die gleiche Gesamtenergie je entsprechendem Partialton aufweist.

Zur Ermittlung der Unähnlichkeiten zwischen den vier Originalklängen und den vier synthetischen Klängen wurden in drei nach Tonlagen getrennten Hörversuchen alle möglichen Paarvergleiche der acht Klänge dargeboten, wobei niemals ein und derselbe Klang zu vergleichen war. Jedes Paar wurde einmal wiederholt, bevor die Versuchsperson ein Unähnlichkeitsmaß anzugeben hatte, das die subjektive Distanz zwischen den beiden unterschiedlichen Klängen im Paar beschreibt. Hierzu war eine Skala von 1 (kleinere Unähnlichkeit) bis 9 (größere Unähnlichkeit) vorgegeben. Eine vorangestellte Übung ermöglichte den Versuchspersonen eine Anpassung der wahrgenommenen Unterschiede an den vorgegebenen Wertebereich. Alle Paarvergleiche wurden jeweils acht mal in randomisierter Folge dargeboten. An den Experimenten nahmen acht bis neun normalhörende Versuchspersonen im Alter von 25 bis 53 Jahren teil, die über eine gute bis sehr umfassende musikalische Bildung verfügen.

## Tiefe Tonlage

Die gemittelten Interquartilbereiche der einzelnen Versuchspersonen, die die Konstanz der einzelnen Versuchspersonen bei der Beurteilung der Distanzen abbilden und damit eine Aussage über die intraindividuellen Schwankungen zulassen, erstrecken sich über etwa 2 Distanzeinheiten. Es kann also eine hohe Konstanz der einzelnen Versuchspersonen bei den Beurteilungen festgestellt werden. Auf Grund der geringen intraindividuellen Schwankungen können aus den Interquartilbereichen, die sich aus allen Daten der Versuchspersonen ergeben, Aussagen über die Beurteilung der Distanzen der einzelnen Paarvergleiche durch verschiedene Versuchspersonen gemacht werden. Die

sich aus allen Daten ergebenden Interquartilbereiche überstreichen im Mittel etwa 2 Distanzeinheiten, so daß die verschiedenen Versuchspersonen die einzelnen Paarvergleiche mit sehr ähnlichen Distanzen beurteilten.

Aus den Medianen der ermittelten Distanzmaße aller Versuchspersonen wurde anhand eines multidimensionalen Skalierungsalgorithmus ein zweidimensionales geometrisches Distanzmodell berechnet (Abb.1). Die ermittelte Konfiguration stellt die beste Repräsentation der subjektiven Distanzen, die zwischen den einzelnen Klängen beobachtet werden, in der Ebene dar.

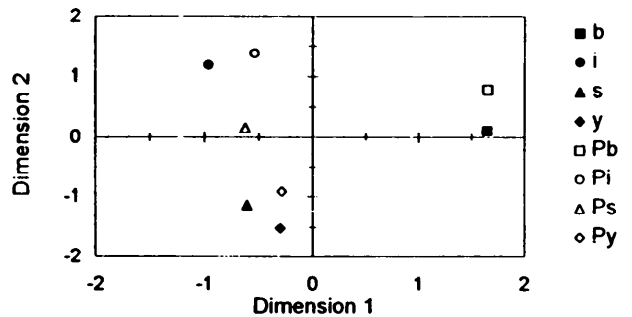


Abb.1: Zweidimensionales Euklidisches Distanzmodell für die tiefe Tonlage (C2). Stress = 0.09446.

Die Anordnung der Originalklänge entlang der Dimension 1 stimmt mit der in [1] berechneten Konfiguration überein. Die synthetischen Klänge liegen entlang der Dimension 1 entsprechend ihrer spektralen Energieverteilung in der Nähe des zugehörigen Originalklangs, das die gleiche spektrale Energieverteilung besitzt. Damit bestätigt sich in der tiefen Tonlage der zunächst vermutete Zusammenhang zwischen der Dimension 1 und der spektralen Energieverteilung. Bei der klanglichen Beurteilung einzelner Flügelklänge ist also die spektrale Energieverteilung ein bedeutendes Kriterium.

Die unterschiedlichen zeitlichen Partialtonverläufe der synthetischen und originalen Töne gleicher spektraler Energieverteilungen führen bei der klanglichen Beurteilung lediglich zu kleinen Unähnlichkeitsmaßen: Die Mediane der Distanzen zwischen synthetischen und originalen Tönen gleicher spektraler Energieverteilungen betragen 1 bis 3, die subjektiven Distanzen der anderen Paarvergleiche liegen zwischen 5 und 8. Die Beurteilung nach diesem Kriterium fällt also im Vergleich zur spektralen Energieverteilung nur geringfügig ins Gewicht.

## Mittlere Tonlage

In der mittleren Tonlage erstrecken sich die gemittelten Interquartilbereiche über etwa 2 Distanzeinheiten, so daß auch hier eine hohe Konstanz der einzelnen Versuchspersonen bei den Beurteilungen vorzufinden ist. Die verschiedenen Versuchspersonen beurteilen die einzelnen Paarvergleiche mit sehr ähnlichen Distanzmaßen, wie aus den im Mittel 2 bis 3 Distanzeinheiten überstreichenden Interquartilbereichen, die sich aus allen Daten ergeben, gefolgert werden kann.

In Abb.2 ist das aus den Medianen berechnete geometrische Distanzmodell für die beste Repräsentation der subjektiven Distanzen in der Ebene dargestellt.

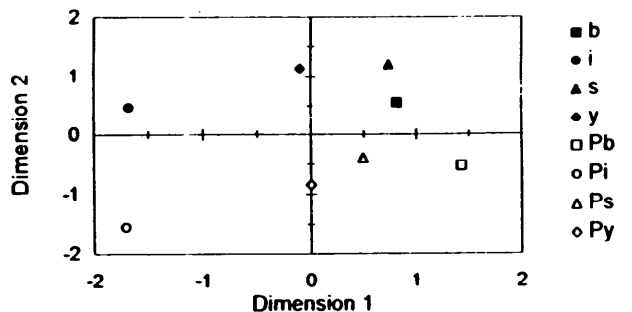


Abb.2: Zweidimensionales Euklidisches Distanzmodell für die mittlere Tonlage (C4). Stress = 0.11745.

Auch hier entspricht die Anordnung der Originalklänge entlang der Dimension 1 derjenigen, die sich in [1] ergeben hatte. Die Anordnung der synthetischen Klänge entlang der Dimension 1 erfolgt ebenfalls entsprechend ihrer spektralen Energieverteilung. Damit bestätigt sich auch in der mittleren Tonlage der vermutete Zusammenhang, und die spektrale Energieverteilung erweist sich auch in dieser Tonlage als ein bedeutendes Charakteristikum bei der Beurteilung einzelner Flügelklänge.

Auffällig in dieser Tonlage ist die deutliche Trennung zwischen synthetischen und originalen Tönen, die sich im wesentlichen in ihren zeitlichen Eigenschaften unterscheiden. Ein zweites maßgebliches Merkmal bei der klanglichen Beurteilung von einzelnen Flügelklängen ist also auch die zeitliche Eigenschaft der Einzelklänge.

### Hohe Tonlage

Auch in der hohen Tonlage kann von einer relativ hohen Konstanz der einzelnen Versuchspersonen bei den Beurteilungen gesprochen werden, da die gemittelten Interquartilbereiche etwa 2 bis 3 Distanzeinheiten überstreichen. Die einzelnen Paarvergleiche werden mit relativ ähnlichen Distanzmaßen von den verschiedenen Versuchspersonen beurteilt, da sich die Interquartilbereiche aller Daten im Mittel über 3 Distanzeinheiten erstrecken.

Das aus den Medianen berechnete zweidimensionale Distanzmodell ist in Abb.3 dargestellt.

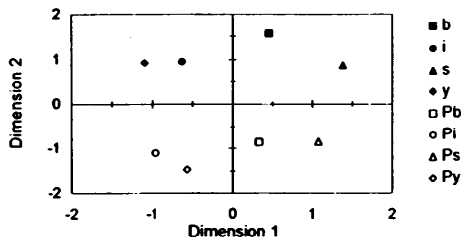


Abb.3: Zweidimensionales Euklidisches Distanzmodell für die hohe Tonlage (C6). Stress = 0.01325.

Auch hier wird der Zusammenhang zwischen der Dimension 1 und der spektralen Energieverteilung bestätigt. Zusammenfassend kann man also festhalten, daß sich die spektrale Energieverteilung in allen drei Tonlagen als ein bedeutendes Kriterium bei der Beurteilung einzelner Flügelklänge erweist.

Wie in der mittleren Tonlage zeigt sich auch in der hohen Tonlage eine deutliche Trennung der synthetischen und originalen Klänge und damit eine Aufteilung der einzelnen Flügelklänge nach ihren zeitlichen Eigenschaften.

### Quantitatives Modell

Zur Beschreibung der spektralen Energieverteilungen der einzelnen Klänge durch mathematische Kennwerte, wurden die Schwerpunkte der spektralen Energieverteilungen bestimmt. Die Brauchbarkeit derartiger Kennwerte wurde überprüft, indem die Korrelation zwischen diesen und den Werten der Dimension 1 für die drei Tonlagen berechnet wurden. Die Korrelationskoeffizienten nach Pearson betragen für die tiefe Tonlage -0.95, für die mittlere Tonlage -0.84 und für die hohe Tonlage -0.90. Für alle drei Tonlagen ergeben sich also hohe bis sehr hohe Korrelationen zwischen den aus den spektralen Energieverteilungen berechneten Schwerpunkten und den aus den Distanzuntersuchungen berechneten Werten der Dimension 1, so daß die Beschreibung durch die Schwerpunkte brauchbar zu sein scheint.

### Qualitätsuntersuchungen

Nachdem sich bei den Qualitätsbeurteilungen der Originalklänge in allen drei Tonlagen ein Zusammenhang zwischen der Dimension 1 des entsprechenden Distanzmodells und dem groben Verlauf der zugehörigen Qualitätsbeurteilungen andeutet [1], wurden Qualitätsuntersuchungen für die synthetischen Klänge, die sich lediglich in der spektralen Energieverteilung unterscheiden, durchgeführt. Auf diese Weise kann der Einfluß der spektralen Energieverteilung auf die Qualitätsbeurteilungen untersucht werden.

In einem Hörversuch wurden für die drei Tonlagen getrennt alle möglichen Paarvergleiche der vier synthetischen Klänge dargeboten, wobei niemals ein und derselbe Klang zu vergleichen war. Jedes Paar wurde einmal wiederholt bevor die Versuchsperson anzugeben hatte, welcher der beiden Klänge im dargebotenen Paar die bessere Qualität besitzt. Alle Paarvergleiche wurden jeweils acht mal in randomisierter Folge dargeboten. Die Versuchspersonen waren die gleichen, die auch bei den Distanzuntersuchungen teilgenommen hatten.

Die Konstanz der Aussagen der Versuchspersonen beträgt in der tiefen Tonlage im Mittel 83%, in der mittleren Tonlage 90% und in der hohen Tonlage 79%. Damit unterscheiden sich die Konstanz der tiefen und hohen Tonlage kaum von den entsprechenden Konstanz bei den Originalklängen [1]. In der mittleren Tonlage zeigt sich bei den synthetischen Klängen eine höhere Konstanz. In Abb.4 sind die mit allen Versuchspersonen gebildeten relativen Häufigkeiten der Bevorzugung und damit die Gesamtbeurteilung für die drei Tonlagen dargestellt.

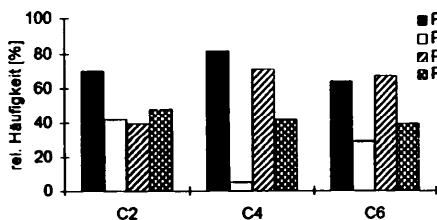


Abb.4: Relative Häufigkeiten der Bevorzugung der einzelnen Flügelklänge in den drei Tonlagen.

In allen drei Tonlagen werden die synthetischen Klänge, die sich auf der einen Seite der Dimension 1 befinden gegenüber den Klängen auf der anderen Seite bevorzugt. Das gleiche Ergebnis ergibt sich auch bei den Originalklängen [1]. Die Qualitätsbeurteilungen der synthetischen Klänge decken sich also hinsichtlich dieser Aufteilung entsprechend der Dimension 1 mit den Qualitätsbeurteilungen der Originalklänge. Bei den synthetischen Klängen ist die Aufteilung in der tiefen Tonlage nicht so deutlich ausgeprägt wie bei den Originalklängen, weil drei von acht Versuchspersonen eindeutig die Klänge im negativen Wertebereich bevorzugten und die restlichen fünf Versuchspersonen diejenigen im positiven Wertebereich bevorzugten, wodurch bei der Gesamtbeurteilung die eigentlich deutlich vorhandene Aufteilung verwischt. Tendenziell läßt sich jedoch in allen drei Tonlagen eine Bevorzugung der Klänge, die sich im positiven Wertebereich der Dimension 1 befinden feststellen. Diese Klänge zeichnen sich durch geringere Schwerpunkte der spektralen Energieverteilungen und damit durch geringere Energien in den hohen Frequenzen aus.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die spektrale Energieverteilung in allen drei Tonlagen ein wesentliches Kriterium bei der klanglichen Beurteilung der einzelnen Flügelklänge hinsichtlich der Distanzen wie auch der Qualitäten ist.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Terhardt für die vielen wertvollen Anregungen und die kritische Durchsicht des Manuskripts.

### Literatur

- [1] Valenzuela, M. N., Fortschritte der Akustik - DAGA 95, 587-590 (1995).
- [2] Meyer, J., Akustik und musikalische Aufführungspraxis, Bochinsky Verlag, 88-92 (1995).
- [3] Hundley, T. C., Benioff, H., Marín, D. W., J. Acoust. Soc. Am. 64, 1303-1309 (1978).
- [4] Grey, J. B., Gordon, J. W., J. Acoust. Soc. Am. 63, 1493-1500 (1978).
- [5] Kruskal, J. B., Psychometrika 29, 1-27 (1964)