

**Zeitschrift:** Publikationen der Schweizerischen Musikforschenden Gesellschaft.  
Serie 2 = Publications de la Société Suisse de Musicologie. Série 2

**Herausgeber:** Schweizerische Musikforschende Gesellschaft

**Band:** 41 (2000)

**Artikel:** Klänge und Farben - Spektren in der Akustik und Optik

**Autor:** Muzzulini, Daniel

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-858810>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 11.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Klänge und Farben – Spektren in der Akustik und Optik

Daniel Muzzulini

## 1. Einleitung

Räumliche Konnotationen bei der Wahrnehmung und Konzeption von Musik sind in unserem Kulturkreis, was die Zeit und Tonhöhe anbelangt, selbstverständlich: Die Zeit läuft auf der Horizontalen von links nach rechts, hochfrequente Töne sind in der Vertikalen oben, ein Aufstieg ist eine Zunahme an Zeit und Tonhöhe usw. Unsere konventionelle Notenschrift widerspiegelt diese Auffassung.<sup>1</sup> Angaben zu Dynamik und Klangfarbe werden darin nicht oder nur teilweise graphisch veranschaulicht. Sie sind gewöhnlich nicht in absolut messbarer Weise auf physikalische Eigenschaften des gemeinten Schalles bezogen.<sup>2</sup> Dynamikangaben wie *f*, *ff*, *mp* und *crescendo*-Zeichen suggerieren zwar eine unterlegte lineare Ordnung der Lautstärken, eine solche ist aber instrumentenspezifisch (*forte* einer akustischen Gitarre kann nur schwer mit *piano* einer Orgel mithalten), abhängig von der Raumakustik und in klassischen Partituren oft nur lückenhaft notiert. Die Klangfarbe wird meist durch Angabe des Instruments<sup>3</sup> und spieltechnische Hinweise eingegrenzt (Violine gezupft, Trompete mit Dämpfer).

Arnold Schönbergs Überlegungen im Schlusskapitel der *Harmonielehre* (1911)<sup>4</sup> zur Dimension und Klangfarbe sind deshalb aus der Sicht der Musiktheorie wohl genau so revolutionär wie seine Abrechnung mit der traditionellen Harmonielehre. Aus der Sicht der Naturwissenschaften und der Mathematik erscheint der Ansatz allerdings nicht unzeitgemäss:

- 1 Die logischen Einsatzzeiten einer Melodie müssen allerdings aus den Noten- und Pausenwerten berechnet werden.
- 2 Zeit und Tonhöhe sind bei der Detailgestaltung auch Interpretationsparameter (Agogik und Intonation), aber mit Bezug auf ein definiertes Raster.
- 3 Solche Angaben lassen manchmal noch Interpretationsspielraum. Die *Clavier-Übung* J. S. Bachs ist für Tasteninstrumente, eine klanglich heterogene Instrumentengruppe, geschrieben.
- 4 Arnold Schönberg: *Harmonielehre*. Leipzig–Wien: Universal-Edition. 1911. S. 470–471.



Der Stand der Mathematik um 1850 erlaubt es ohne weiteres, Klangfarben als Punkte in mehrdimensionalen Räumen zu interpretieren.<sup>5</sup> Auf den ersten Blick scheint also Schönbergs Forderung einer Theorie der Klangfarben weniger Utopie als Ausdruck eines mangelhaften Informationsaustausches zwischen Naturwissenschaft und Kunst zu sein.<sup>6</sup>

Kritisch wird die Anwendung der Theorie der mathematischen Räume, wenn sie wahrnehmungspsychologische Geltung beansprucht. Als Problemunkte wären etwa die hohen Dimensionen, die Verbindlichkeit der Metrik und nicht zuletzt die Definition der Klangfarbe zu nennen. Der oft gehörte Einwand gegen serielle Kompositionstechniken, die gedachten Strukturen seien gehörmässig nicht nachvollziehbar, ist ernst zu nehmen.

Dennoch wird die Klangfarbe heute in der psychoakustischen Fachliteratur als «multidimensionales Attribut»<sup>7</sup> verstanden. Damit ist vorerst nur ausgedrückt, dass die Klangfarben der Musikinstrumente *nicht* so auf einer geraden Linie angeordnet werden können, dass ihre empfindungsmässige Verwandtschaft genau den Abständen auf dieser Geraden entspricht. Die Gehörpsychologie macht sich zur Aufgabe, einen Klangfarbenraum mit möglichst kleiner Dimension so zu definieren, dass die darin geltenden Abstandsbeziehungen zwischen Klangfarben (den Punkten im Raum) mit den Unähnlichkeitsurteilen eines «Normalbeobachters» korrespondieren. Ferner wird versucht, das Koordinatensystem so zu legen, dass die Achsen mit psychoakustischen Grössen wie Helligkeit, Schärfe oder Volumen korrelieren. Die Koordinaten eines Klangpunktes sollen dabei aus dem physikalischen Signal direkt ableitbar sein. Die bisher untersuchten Räume sind meistens drei- oder vierdimensional.<sup>8</sup>

5 Das Theorem von Fourier (1828) wird von Georg Simon Ohm bereits um 1840 auf die Musik angewandt, und Hermann von Helmholtz macht 1863 seine Ortstheorie des Hörens der musiktheoretischen Öffentlichkeit bekannt. Um 1850 ist mit den Arbeiten von Bernhard Riemann auch die Theorie der Vektorräume in der Lage, die periodischen Funktionen als Punkte in Vektorräumen zu interpretieren, wenn man das Theorem von Fourier voraussetzt.

6 Ob Schönberg Hermann von Helmholtz, *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage der Musik* (Braunschweig, 1863) vor der Abfassung seiner Harmonielehre (1911) zumindest oberflächlich bekannt war, wie Carl Dahlhaus vermutet, ist (noch) ungeklärt. Vgl. Carl Dahlhaus, *Schönberg und andere* (1970). *Gesammelte Aufsätze zur Neuen Musik*. Mainz: Schott. 1978. S. 182.

7 Vgl. Reinier Plomp, «Timbre as a Multidimensional Attribute of Complex Tones.» In: R. Plomp und G. F. Smoorenburg (Hg.), *Frequency Analysis and Periodicity Detection in Hearing*. Leiden: A. W. Sijthoff. 1970. S. 397–414.

8 Vgl. John R. Pierce, «Klang, Musik mit den Ohren der Physik.» Heidelberg: *Spektrum der Wissenschaft*. 1989 (2. Aufl.). S. 162–165; Stephen McAdams und Jean-Christophe Cunibide, «Perception of Timbral Analogies.» In: *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 336, London Series B (1992) (<http://mediatheque.ircam.fr>).



Besondere Schwierigkeiten bereitet der Vergleich von Klängen verschiedener Tonhöhen und die Klassifikation von nicht-periodischen und nicht-stationären Klängen. Eine Klangfarbendefinition, die sich aus einer begrifflichen Komplementbildung zu anderen Klangeigenschaften (Tonhöhe, Lautstärke, Dauer) ergibt<sup>9</sup>, steht und fällt mit der Definierbarkeit ihrer Referenzbegriffe. Die Debatte um die Residualtöne<sup>10</sup> macht deutlich, dass die Definition der Tonhöhe durch eine Gleichsetzung der Tonhöhe mit der Periodizität eines Schallsignals nicht unproblematisch ist.

Die physiologische Optik kennt für das Farbsehen eine ähnliche Fragestellung, die im folgenden vergleichend und vereinfacht zur Darstellung gebracht wird. Eine sensorisch relevante Klassifikation der Farben in einem dreidimensionalen, euklidischen Vektorraum hat für die moderne Reproduktionstechnik eine ungemein wichtigere Bedeutung erlangt<sup>11</sup> als ihr Pendant in der Akustik. Es hat sich herausgestellt, dass die empfundenen Farbschiede und das Prinzip der additiven Farbmischung unverträglich sind.

## 2. Farben

Vier Sinneszelltypen registrieren die Wellenlängen (400–750 nm) des sichtbaren Lichts. Die drei Sorten Zäpfchenzellen sind je frequenzempfindlich in verschiedenen Bereichen, die Stäbchenzellen sind für die Registrierung der Helligkeit bzw. für die Kontrasteinstellung zuständig. Letztere sind im ganzen Sehbereich frequenzempfindlich.

Die drei Zäpfchenzellen können mit Resonatoren verglichen werden. Ein mit seiner spezifischen Eigenfrequenz angeregtes Zäpfchen führt zu maximaler Resonanz. In der Umgebung der Resonanzfrequenz ist dieser Effekt

9 Zur Definition der American Standards Association (ASA, 1973) vgl. A.J.M. Houtsma, «Pitch and Timbre: Definition, Meaning and Use.» In: *Journal of New Music Research*, Vol. 26 (1997). S. 105; Helmholtz, *Die Lehre von den Tonempfindungen*, S. 20; vgl. auch Fussnoten 24 und 25.

10 Vgl. Christoph Reuter, *Die auditive Diskrimination von Orchesterinstrumenten* (= Europäische Hochschulschriften, Reihe XXXVI Musikwissenschaft, Bd. 162). Frankfurt am Main: Peter Lang. 1996. S. 17–28; Johannes Barkowsky, *Das Fourier-Theorem in musikalischer Akustik und Tonpsychologie* (= Schriften zur Musikpsychologie und Musikästhetik, Bd. 8). Frankfurt am Main: Peter Lang. 1996. S. 209–263.

11 Kurt Schläpfer, *Farbmetrik in der Reproduktionstechnik und im Mehrfarbendruck*. St. Gallen: UGRA Verein zur Förderung wissenschaftlicher Untersuchungen in der grafischen Industrie. 2. Auflage. 1993.



abgeschwächt. Die Resonanz kann in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz durch eine glockenförmige Kurve mit Maximum bei der Zäpfchenfrequenz beschrieben werden. Diese Resonanzkurven sind als Reaktion auf monochromatisches Licht variabler Frequenz zu deuten. Monochromatisches Licht zwischen Grün (g) und Blau (b) regt sowohl die g-Zäpfchen als auch die b-Zäpfchen an: Die Resonanzkurven sind auf der Frequenzachse nicht scharf voneinander getrennt.

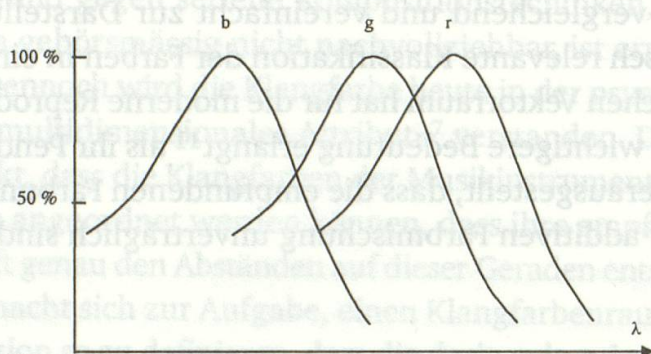


Abb. 1: Empfindlichkeitskurven der Zapfchenzellen schematisch. In x-Richtung sind die Wellenlängen, in y-Richtung der Prozentsatz der angeregten Sinneszellen pro Zelltyp aufgetragen. In der Literatur herrscht Uneinigkeit über die genaue Lage der Maxima, vgl. Harald Küppers, *Schule der Farben*. Köln: DuMont. 1992. S. 35–36.

Vereinfacht könnte man sich einen «Bildpunkt» des Auges aus vier Sinneszellen zusammengesetzt, zu jedem Typ eine, vorstellen.<sup>12</sup> Auf Kontexteffekte soll hier nicht eingegangen werden: Unsere Modellvorstellung bezieht sich auf das Betrachten einer einheitlich gefärbten riesigen Leinwand.

Zu realen Farbeindrücken gehören in der Regel kontinuierliche Spektren (abhängig von der Frequenzzusammensetzung des Sonnenlichtes oder der jeweiligen künstlichen Beleuchtung). Bei einem solchen Farbeindruck wird jeder Bildpunkt des Auges mit einem kontinuierlichen Spektrum konfrontiert. Aus der Energie, die in die jeweiligen Resonanzbereiche fällt, resultieren drei Farb-Kennwerte<sup>13</sup>, die ans Gehirn weitergeleitet werden. Es ist die Aufgabe des Gehirns, die Kennwerte in einen punktförmigen Farb-/Helligkeitseindruck zu verwandeln: Das Gehirn muss die durch die Analyse der

12 Im Bereich des schärfsten Sehens, der Fovea, gibt es keine Stäbchenzellen.

13 Wir interpretieren hier den Helligkeitswert  $h$  stark vereinfacht als redundante Information:  $h = r + g + b$ .



Rezeptorzellen gewonnene Information wieder synthetisieren. Sinnespsychologische Untersuchungen versuchen, durch Befragung von Testpersonen via Statistik einen Rückschluss auf die Wahrnehmung zu gewinnen. Das Ziel besteht darin, die Farbeindrücke so in einem räumlichen Gebilde anzuordnen, dass «Gleichabständigkeit» herrscht. Gleiche Wahrnehmungsdifferenzen entsprechen gleichen Distanzen im Farbraum. Die Wahrnehmungstheorie versucht, die physikalischen Daten (Spektrum pro Bildpunkt) auf die psychologischen Daten (Farbeindruck pro im Gehirn repräsentierter Bildpunkt) abzubilden. Aus den Resonanzeigenschaften der Sinneszellen folgt unmittelbar, dass verschiedene Spektren gleiche Farbeindrücke hervorrufen können, denn die ganze Information einer Spektralkurve wird auf nur drei Farbkennzahlen reduziert. So kann im Extremfall ein als Linienspektrum präsentierter Sinnesreiz nicht von einem breitbandigen kontinuierlichen Spektrum unterschieden werden. Aus den Kennwerten kann also nicht umgekehrt auf die Form der Spektralkurve geschlossen werden.

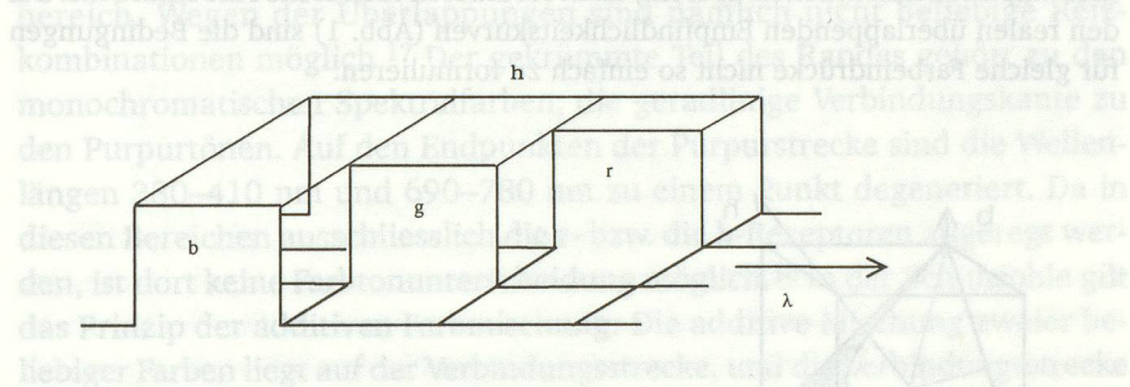


Abb. 2: Vereinfachtes Modell des Sehens. Die Resonanzkurven der vier Rezeptortypen als «ideale Bandpassfilter». Die Helligkeitsfunktion  $h$  enthält keine neue Information:  $h = r + g + b$

Ein stark vereinfachtes Modell des Sehens geht von disjunkten, nahtlos aneinander angrenzenden Resonanzbereichen und stufenförmigen Resonanzkurven aus.<sup>14</sup> Die Wirkung einer Resonanzkurve bei Bestrahlung durch monochromatisches Licht entspricht derjenigen eines idealen Bandpassfilters: Durchgelassen wird der Bereich des Spektrums zwischen den Grenzfrequenzen, und zwar völlig unverzerrt. Wird die Helligkeitsfunktion der Stäbchenzellen ebenfalls als solche stufenförmige Bandpassfunktion angenommen, enthält sie keine zusätzliche Information. Die drei Farbkennwerte zu einem kontinuierlichen

14 Vgl. Jan-Peter Homann, *Digitales Colormangement. Farbe in der Publishing-Praxis*. Springer. 1998. S. 10–12.



Spektrum entsprechen dann genau den Energien, die in die Durchlassbereiche fallen.<sup>15</sup> Anhand dieses vereinfachten Modells lässt sich die Tatsache, dass verschiedene Spektren die gleiche Farbwahrnehmung hervorrufen können, einfach illustrieren (vgl. Abbildung 3).<sup>16</sup>

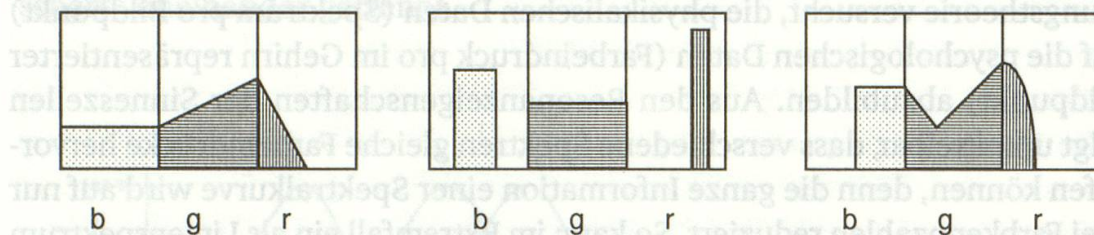


Abb. 3: Metamerie im vereinfachten Modell des Sehens. Stimmen die Flächen in allen drei Empfindlichkeitszonen überein, dann resultieren identische Farbeindrücke. Bei den realen überlappenden Empfindlichkeitskurven (Abb. 1) sind die Bedingungen für gleiche Farbeindrücke nicht so einfach zu formulieren.

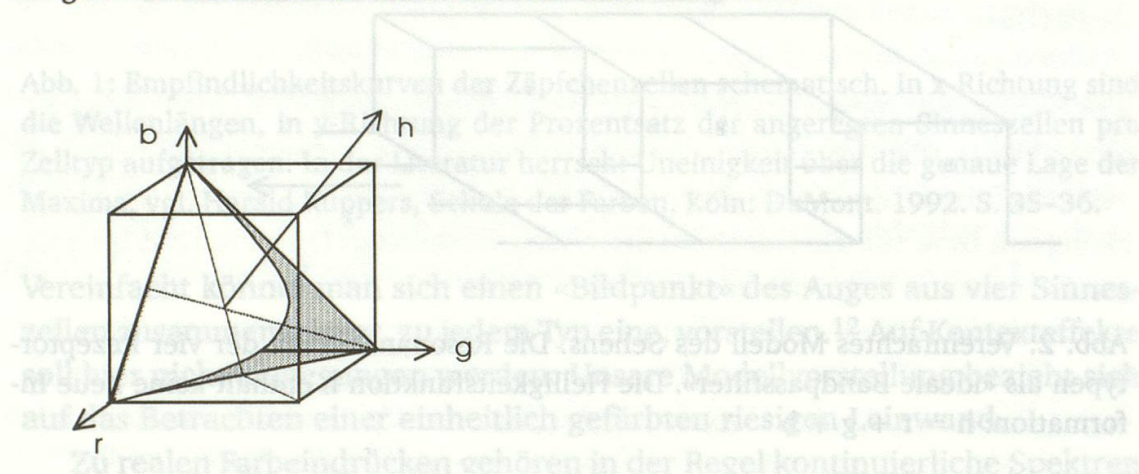


Abb. 4: Räumliche Veranschaulichung der Farben in einem Würfel. Die Farben gleicher Helligkeit bilden im vereinfachten Modell (Abb. 2) gleichseitige Dreiecke orthogonal zur Unbuntachse h. Für die realen Resonanzkurven (Abb. 1) erhält man anstelle der gleichseitigen Dreiecke eine darin enthaltene schuhsohlenförmige Teilmenge (schematisch).

15 Sie werden durch Integration der Spektralkurve über die Durchlassbereiche bestimmt. Allgemein sind die Kennwerte als Integral über das Produkt von Spektralkurve und Filterfunktion zu berechnen.

16 Mit diesem Phänomen hängt eng zusammen, dass gewisse Körperfarben je nach Beleuchtung mehr oder weniger gut unterschieden werden können. Die verschiedene Reflexionscharakteristik der Körper bewirkt erst in einer anderen Beleuchtung verschiedene Farbkennwerte.



Diesem Modell entspricht in natürlicher Weise eine Anordnung der Farben in einem Würfel. Die ungemischten Primärfarben  $r$ ,  $g$  und  $b$  bilden die Koordinatenachsen des Würfels. Die Farben gleicher Helligkeit liegen darin auf gleichseitigen Dreiecken, die senkrecht zur Hauptdiagonalen liegen. Die Ecken dieser Dreiecke sind die Primärfarben, die Dreiecksseiten entsprechen den aus zwei Komponenten bestehenden Farben, und den im Innern liegenden Punkten entsprechen die Farben aus drei Mischungskomponenten. Der Mittelpunkt ist der Unbuntpunkt. In diesem Modell gibt es keinen Spektralfarbenzug: Bei der Variierung der Frequenz monochromatischen Lichts bleibt der Farbeindruck der zugehörigen Primärfarbe bis zum Erreichen der nächsten Filtergrenze konstant und ändert dann sprunghaft zur nächsten Primärfarbe. Vergleicht man diese geometrischen Verhältnisse mit der Anordnung der Farben, die sich aus den glockenförmigen und überlappenden Resonanzkurven ergeben, erhält man für die Farben gleicher Helligkeit anstelle des gleichseitigen Dreiecks einen darin enthaltenen schuhsohlenförmigen Teilbereich. Wegen der Überlappungen sind nämlich nicht beliebige Reizkombinationen möglich.<sup>17</sup> Der gekrümmte Teil des Randes gehört zu den monochromatischen Spektralfarben, die geradlinige Verbindungskante zu den Purpurtönen. Auf den Endpunkten der Purpurstrecke sind die Wellenlängen 380–410 nm und 690–780 nm zu einem Punkt degeneriert. Da in diesen Bereichen ausschliesslich die  $r$ - bzw. die  $b$ -Rezeptoren angeregt werden, ist dort keine Farbtonunterscheidung möglich.<sup>18</sup> In der Schuhsohle gilt das Prinzip der additiven Farbmischung: Die additive Mischung zweier beliebiger Farben liegt auf der Verbindungsstrecke, und die Verbindungsstrecke wird im Mischungsverhältnis der Komponenten geteilt. Insbesondere kann jeder Farbeindruck als Mischung einer Spektralfarbe und einer Unbuntfarbe erzeugt werden. Diese Möglichkeit legt die Verwendung der sogenannten Helmholtz-Masszahlen als Koordinaten, nämlich Zylinderkoordinaten zur Unbuntachse, nahe (vgl. Abbildung 5a). Der Winkel beschreibt den Farbton, der Abstand zur Unbuntachse die Sättigung, der Abstand der Dreiecksebene vom Koordinatennullpunkt die Helligkeit.<sup>19</sup> Diese Darstellung bezieht sich auf die Schnittstelle Sinneszellen/Gehirn und enthält keine Angaben über die neuronale Weiterverarbeitung der Farbinformation.

17 Zusammen mit dem  $g$ -Rezeptor wird automatisch mindestens einer der beiden andern angeregt. Die Reizkombination  $r=0\%$ ,  $g=100\%$ ,  $b=0\%$  kommt also unter normalen Umständen nicht vor.

18 Schläpfer, S. 58.

19 Die Schuhsohle und die Interpretation der «psychooptischen» Grössen Farbton, Sättigung, Helligkeit findet sich bei Helmholtz, *Handbuch der physiologischen Optik*. Leipzig. 1867; vgl. Olga Schulisch, *Wahrnehmungstheorien bei Hermann von Helmholtz und ihre semiotische Analyse*. Diss. Universität Stuttgart. 1982. S. 65–67.



Die in der optischen Schuhsohle geltenden Abstandsbeziehungen sind in einem nächsten Schritt mit den Wahrnehmungsverhältnissen zu vergleichen. Anstelle der idealen gleich grossen Kreise für gleiche Farbunterschiede ergibt die sinnespsychologische Vermessung Ellipsen. Diese sogenannten McAdam-Ellipsen sind je nach Ort in der Schuhsohle verschieden in ihrer Grösse, ihrer Ausrichtung und ihrem Halbachsenverhältnis (vgl. Abbildung 5b). Es ist deshalb nicht möglich, durch eine *lineare* Verzerrung der Schuhsohle eine Anordnung zu finden, die die psychologischen Farbverhältnisse exakt wiedergibt. Bei der zu diesem Zweck erforderlichen *nicht-linearen* Transformation<sup>20</sup> geht die additive Farbmischungseigenschaft verloren: additive Mischfarben liegen in der transformierten Schuhsohle auf gekrümmten Verbindungslinien! Die Kenntnis dieser Transformation ist für eine farbechte Reproduktion auf Monitoren (additive Farbmischung) nützlich. Einen Kompromiss stellt das CIELUV-Farbsystem dar, das auf einer die Gleichabständigkeit optimierenden linearen Verzerrung beruht, wodurch die additive Farbmischungseigenschaft erhalten bleibt.<sup>21</sup>

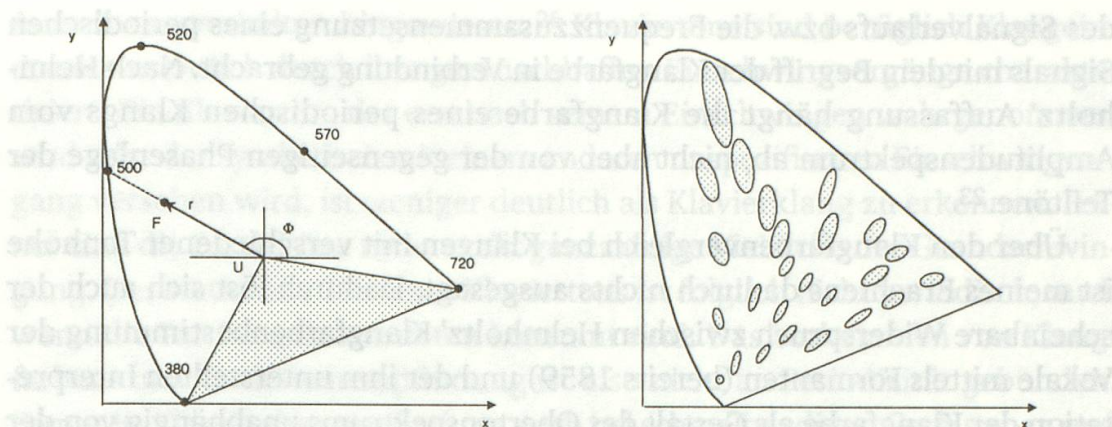
### 3. Klänge

Eine mit der Optik vergleichbare psychoakustisch verbindliche Klassifikation von Schallspektren steht noch aus. Im Unterschied zur Optik ist die Unterscheidung von diskreten und kontinuierlichen Spektren für die Wahrnehmung von Bedeutung. Ein hörbares Schallsignal kann als Frequenzgemisch von Sinusschwingungen im Bereich 20–20000 Hz verstanden werden. Dabei wird das Aussenohr in guter Näherung als punktförmiger Empfänger interpretiert. Stereohören wird durch ein Paar solcher Empfänger beschrieben. Das Innenohr wird seit Helmholtz als Fourieranalysator gedeutet. Helmholtz postuliert 1863 eine räumliche Fourieranalyse auf der Basilarmembran, d.h. je nach Frequenzkomponente des auftreffenden Schalls werden andere Stellen auf der Basilarmembran angeregt. Der grössere wahrnehmbare Frequenzbereich 10 Oktaven ( $20000 : 20 = 1000 = \text{ca. } 2^{10}$ ) beim Schall steht einer knappen «Oktave» ( $750 : 400 < 2 = 2^1$ ) beim Licht gegenüber. Auf der anderen Seite erlaubt das Sehsystem eine sehr grosse Anzahl Bildpunkte trennscharf zu verarbeiten.

20 Vgl. Werner Meyer-Eppler, *Grundlagen und Anwendungen der Informationstheorie*. Springer. 1969 (2. Aufl.). S. 286–289.

21 Das CIELUV-System hat sich nicht durchgesetzt; vgl. Schläpfer, S. 73–76.





(Links) Abb. 5a: Farbton und Sättigung im CIE-Dreieck (Schuhsohle). Die x-Koordinate beschreibt im wesentlichen den r-Anteil, die y-Koordinate den g-Anteil einer Farbe. Zur Beschreibung der Farben gleicher Helligkeit eignen sich Polarkoordinaten, denn diese können wahrnehmungspsychologisch interpretiert werden: Der Winkel  $\phi$  beschreibt den *Farbton*, der Abstand  $r$  vom Unbuntpunkt  $U$  die Sättigung der Farbe  $F$ . Jede Farbe ausserhalb des schraffierten Dreiecks kann durch additive Farbmischung einer Unbuntfarbe und einer farbtongleichen Spektralfarbe erhalten werden. Im Beispiel ist die Wellenlänge der farbtongleichen Spektralfarbe 500 nm. Die geradlinige Verbindung der Spektralfarben 380 nm (Ultraviolett-Grenze) und 720 nm (Infrarot-Grenze) heisst Purpurstrecke.

(Rechts) Abb. 5b: Elliptische Farbvalenzen im CIE-Farbendreieck. Die Ellipsen sind verschieden in Grösse, Halbachsenverhältnis und Ausrichtung. Entsprechen die Abstandsverhältnisse im CIE-Dreieck genau den wahrnehmungspsychologischen Verwandtschaften, dann wären die Valenzen kreisförmig und gleich gross. (Die Abb. 5a und 5b basieren auf Schläpfer, S.66, Abbildung 31.)

Die unterschiedliche Grösse der Frequenzbereiche des sichtbaren Lichts und des hörbaren Schalls hat eine bemerkenswerte Konsequenz: Da die Farbe eines periodischen Lichtsignals allein durch die Frequenz bestimmt ist, spielt die Form des Signalverlaufs innerhalb einer Periode keine Rolle für den resultierenden Farbeindruck. Sinusschwingungen können also in ihrem Farbeindruck prinzipiell nicht von Sägezahn- oder Rechteckschwingungen unterschieden werden, da alle Sinuskomponenten mit Partialordnung  $> 1$  in den Ultraviolettbereich fallen.<sup>22</sup> In der Musiktheorie dagegen wird die Form

<sup>22</sup> Für periodische Klänge  $> 10000$  Hz ist aus dem analogen Grund auch keine gehörmässige Differenzierung mehr möglich.



des Signalverlaufs bzw. die Frequenzzusammensetzung eines periodischen Signals mit dem Begriff der Klangfarbe in Verbindung gebracht. Nach Helmholtz' Auffassung hängt die Klangfarbe eines periodischen Klangs vom Amplitudenspektrum ab, nicht aber von der gegenseitigen Phasenlage der Teiltöne.<sup>23</sup>

Über den Klangfarbenvergleich bei Klängen mit verschiedener Tonhöhe ist meines Erachtens dadurch nichts ausgesagt. Dadurch löst sich auch der scheinbare Widerspruch zwischen Helmholtz' Klangfarbenbestimmung der Vokale mittels Formanten (bereits 1859) und der ihm unterstellten Interpretation der Klangfarbe als Gestalt des Obertonspektrums unabhängig von der Tonhöhe.

### 3. 1 Definition der Klangfarbe

Allgemein versteht man unter Klangfarbe das Spezifische, das verschiedene Instrumente, die denselben Ton (gleiche Frequenz) mit gleicher Dauer und gleicher Lautstärke spielen, unterschiedlich klingen lässt. Helmholtz' Negativ-Definition der Klangfarbe<sup>24</sup> deckt sich mit der von der ASA 1973<sup>25</sup> vorgeschlagenen.

In neuerer Zeit wird in Zusammenhang mit der Wahrnehmung der Klangfarbe auf die Bedeutung der Einschwingvorgänge, manchmal auch auf das

23 Helmholtz, *Die Lehre von den Tonempfindungen*, S. 193. Die begrenzte Gültigkeit dieser Behauptung zeigt sich z. B. im Zusammenhang mit Schwebungen höherer Ordnung und in Zusammenhang mit der Residualtonwahrnehmung; vgl. Horst-Peter Hesse, «Zur Tonhöhenwahrnehmung. Experimentelle Überprüfung des Ohmschen Gesetzes der Akustik.» In: *Hamburger Jahrbuch für Musikwissenschaft*, Bd.1. 1974. S. 233–248; Helmut Fleischer, *Untersuchung zur Hörbarkeit von Phasenänderungen*. Diss. TU München.1976; Reinier Plomp, *Aspects of Tone Sensation. A Psychophysical Study*. London: Academic Press. 1976. S. 88–93; Gerald Langner, «Temporal Processing of Pitch in the Auditory System.» In: *Journal of New Music Research*, Vol. 26. (1997). S. 116–132; Richard E. Berg und David G. Stock, *The Physics of Sound*. New Jersey: Prentice Hall. 1995 (2. Aufl.). S. 159–160.

24 «Unter Klangfarbe verstehen wir diejenige Eigenthümlichkeit, wodurch sich der Klang einer Violine von dem einer Flöte, oder einer Clarinette, oder der menschlichen Stimme unterscheidet, wenn alle dieselbe Note in derselben Tonhöhe hervorbringen.» (Helmholtz, *Die Lehre von den Tonempfindungen*. S. 20.)

25 «that attribute of auditory sensation in terms of which a listener can judge that two sounds similarly presented and having the same loudness and pitch are different»; vgl. Houtsma, S. 105.



Ausschwingverhalten hingewiesen.<sup>26</sup> Klaviertöne sind bezüglich Klangeindruck wesentlich durch ihre geräuschhaften Einschwingvorgänge charakterisiert. Ein Klavierton, der erst nach seinem Einschwingen wahrgenommen wird oder der synthetisch mit einem anderen unspezifischen Einschwingvorgang versehen wird, ist weniger deutlich als Klavierklang zu erkennen. Ferner sind die Partialtöne nicht exakt ganzzahlige Vielfache der Grundschwingung. Der stationäre Teil eines Klaviertons ist folglich nicht periodisch, auch wenn die Partialtonintensitäten konstant sind. Das Vorkommen von Klangfarben- und Tonhöhenempfindung ist also nicht an Periodizität gebunden. Ferner ist Klangfarbenempfindung auch bei schmalbandigen Geräuschen und beispielsweise bei Glockenklängen ohne ausgeprägte Tonhöhen möglich.

### 3. 2 Klassifikation der Vokale mit Formanten

Bei der Vermessung der Klangqualität von Vokalen hat sich ergeben, dass diese nicht durch eine spezifische Gestalt des Obertonspektrums beschrieben werden kann. Die Gestalt des Spektrums einer «Vokalfarbe» variiert nämlich mit der Grundfrequenz und mit der Lautstärke (Intensität) eines gesungenen Vokals. Zur Klassifikation von Vokalen werden Frequenzbänder, sogenannte Formantstrecken verwendet. Sie entsprechen den obigen Bandpassfiltern. Formantstrecken sind feste Intervalle im Frequenzbereich. Die Kennzahlen ergeben sich wiederum durch Integration des Spektrums über eine Formantstrecke. Die Anzahl berücksichtigter Formantstrecken bestimmt die Dimension der Klassifikation. Es gibt auch Musikinstrumente, die Formanten ausbilden. Bei den Doppelrohrblattinstrumenten entstehen diese durch die Eigenfrequenzen der Vibration im Mundstück, bei Saiteninstrumenten sind sie von der Geometrie des Resonanzkörpers abhängig. Nicht alle Instrumente bilden Formanten aus.<sup>27</sup>

26 Reuter, S. 15–17; Klaus Wogram, «Die Bedeutung nicht-stationärer Schwingungsvorgänge für die Bewertung von Musikinstrumenten.» In: Jürgen Meier (Hg.), *Qualitätsaspekte bei Musikinstrumenten, Beiträge zu einem Kolloquium*. Celle: Moeck Verlag. 1988. S. 23–34.

27 Udo Sirker, «Methoden der Klangfarbenforschung dargestellt an quasistationären Klängen von Doppelrohrblattinstrumenten.» In: *Musicae Scientiae Collectaneae*. Köln. 1973. S. 565–566.



### 3. 3 Klangfarbenvergleich bei Klängen mit verschiedener Tonhöhe

Die Art der Produktion und Wahrnehmung von Vokalen legt einen Ansatz der absoluten Klangfarbenklassifikation analog zur Optik mittels Frequenzzonen nahe. Ein solcher Ansatz wurde von Plomp 1970 vorgeschlagen, und zwar für eine Frequenzonenbreite, die der kritischen Bandbreite (1 Bark = ca. eine grosse Terz) entspricht. Die Dimension des Klangfarbenraums beträgt als Folge der Feinheit der Unterteilung allerdings etwa 25. Die Koordinaten einer Klangfarbe sind durch das sogenannte Terzpegelspektrum definiert. Mit diesem Ansatz ergibt sich bei disjunkten Frequenzzonen, wenn man die Grundfrequenz eines Sinustons variiert, eine sprungweise Koordinatenänderung bei jeder Zonengrenze.<sup>28</sup> Dies entspricht wohl kaum der Klangfarbenwahrnehmung bei Sinustönen. Solche Unstetigkeiten ergeben sich auch bei obertonhaltigen Klängen. Zur Behebung dieser Anomalie könnten wie in der Optik überlappende Frequenzzonen und glockenförmige Filterfunktionen verwendet werden.<sup>29</sup> Dadurch erzielt man eine kontinuierliche Koordinatenänderung, wenn sich die Frequenz eines Sinustons kontinuierlich ändert. Die Konsequenz des absoluten Ansatzes für periodische Klänge mit der gleichen Schwingungsform besteht also in einer je nach Frequenz verschiedenen Klangfarbe. Abbildung 6 demonstriert die Problematik der Gestaltähnlichkeit von Spektren aus relativer und absoluter Sicht beim Vergleich periodischer Klänge verschiedener Grundfrequenz.

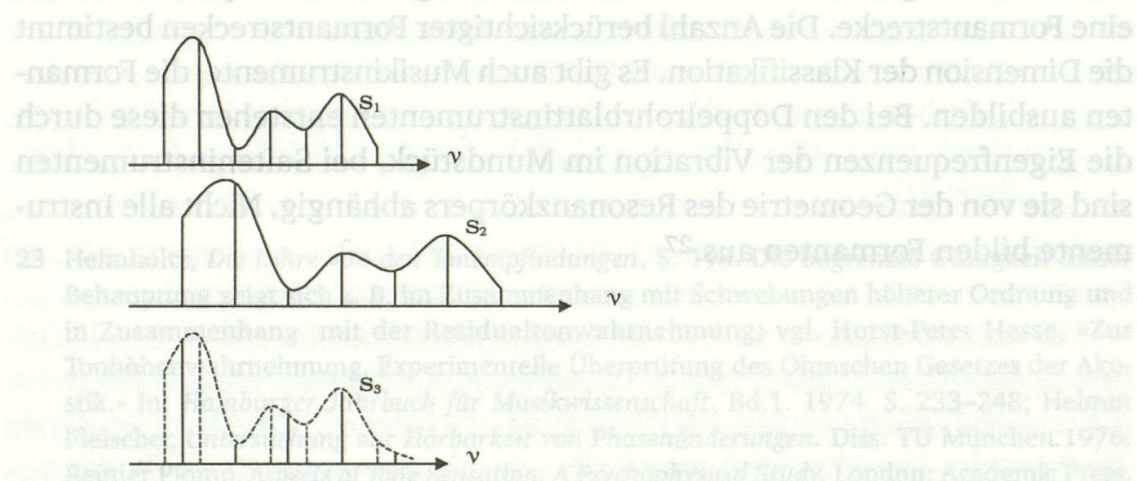


Abb. 6: Klangfarbenähnlichkeit und Gestalt des Obertonspektrums. Das Spektrum  $s_2$  entsteht aus  $s_1$  durch Streckung (gleiche Obertonverhältnisse).  $s_3$  und  $s_1$  sind «fomantähnlich».

28 Beim Übergang von der dritten zur vierten Zone ändern die Koordinaten einer Sinusschwingung mit Amplitude 1 von (0 0 1 0 0 ... 0) zu (0 0 0 1 0 ... 0).

29 Die Methode der B-Spline-Interpolation bietet sich zur effizienten Ermittlung der Kennzahlen aus dem Fourierspektrum an.



Die Methode der Kennzahlenbildung ist im Unterschied zur Betrachtung von Obertonspektren auf beliebige Schallspektren anwendbar. Es ist aber zu bedenken, dass die Charakterisierung von Schallsignalen durch eine Liste von Kennzahlen zur Frequenzgruppenbreite keine Klassifizierung auf dem Unterscheidbarkeitsniveau darstellt wie in der Optik. Identische Kennlisten ermöglichen unterschiedliche Wahrnehmung: Kontinuierliche und diskrete Spektren sind für die Wahrnehmung qualitativ verschieden. Sie könnten aber die gleichen Kennlisten haben. Eine solche Klassifizierung macht also verbindliche Aussagen über den Klangfarbenvergleich von Klängen und Geräuschen: Weisses Rauschen hat die gleichen Kennwerte wie ein Sinustongemisch, das in jeder Frequenzzone genau eine Komponente mit gleicher Amplitude hat.

Selbst wenn nur periodische Signale zum Vergleich zugelassen werden, ist zu erwarten, dass gleiche Kennlisten zu unterscheidbaren Klängen existieren, sobald nämlich mehrere Partialtöne innerhalb der gleichen Frequenzzone liegen.<sup>30</sup> Dies ist für benachbarte Partialtöne mit hoher Ordnungszahl wegen der logarithmischen Unterteilung der Frequenzachse bei der Festlegung der Zonen der Fall.

### 3. 4 Klangfarbenräume mit variabler Dimension?

Vergleicht man diesen Ansatz mit den von Stephen McAdams und Jean-Christophe Cunibile<sup>31</sup> untersuchten drei- und vierdimensionalen Räumen, die sich aus psychoakustischen Experimenten und Anwendung der multidimensionalen Skalierung ergeben, ist zu fragen, wie die drastische Reduktion der Dimension zu erklären ist. Zumal zwei der dort angegebenen psychoakustischen Grössen (spectral flux, attack quality) sich nicht einmal auf stationäre Spektren beziehen. Die Helligkeit ist der einzige Parameter, der aus den Terzpegelspektren ermittelt werden kann. Eine Verringerung der Dimension erhielte man durch eine Reduktion und Vergrösserung der überlappenden Frequenzzonen. Die Dimension der Klassifikation mit Formanten könnte als Funktion der wahrnehmungsbezogenen Musikalität durchaus eine variable Grösse sein. Die Zahl der Frequenzzonen ergäbe dabei die Dimension des individuellen Klangfarbenraums. Die Positionierung und Grösse von Frequenzzonen kann nämlich nicht durch physiologische Gegebenheiten mit

30 Vgl. Kurt Benedini, *Psychoakustische Messung der Klangfarben-Ähnlichkeit harmonischer Klänge und Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Amplitudenspektrum und Klangfarbe durch ein Modell*. Diss. TU München. 1978. S. 29–31.

31 McAdams und Cunibile (vgl. Anm. 8).



zur Optik vergleichbarer Verbindlichkeit festgelegt werden. Es gibt nicht 25 Typen Rezeptorzellen, die je ihren Empfindlichkeitsbereich haben. Die Frequenzverarbeitung auf der Basilarmembran ist ja ortsgebunden. Die hier vorgeschlagene Klassifikation erlaubt es den Komponisten, Klangfarbenmelodien in Räumen mit variabler Dimension zu realisieren. In wieweit in Klangfarbenräumen strukturelle Beziehungen allgemeinverständlich zur Darstellung gebracht werden können, ist allerdings noch wenig erforscht. McAdams und Cunibile<sup>32</sup> untersuchten parallelogrammähnliche Klangfarbenbeziehungen zwischen jeweils vier Klängen gleicher Tonhöhe. Dies entspricht einer Transpositionsbeziehung zwischen den beiden Tonpaaren. Damit wird eine Elementarsituation der räumlichen Orientierung untersucht. Schönbergs Klangfarbenmelodien liegen in weiter Ferne!

#### 4. Spekulation: Die optische Oktave

Kann das Phänomen der Oktavidentität auf die Optik übertragen werden? Die Purpurstrecke verbindet in der «optischen Schuhsohle» die monochromatischen Randpunkte 400 nm (Ultraviolett-Grenze) und 750 nm (Infrarotgrenze). Könnte eine Vergrößerung des Sehbereichs auf eine Oktave (1:2) topologisch als Verformung der Schuhsohle zu einem Farbkreis gedeutet werden? Diese Frage ist auf dem Niveau der Rezeptorzellen negativ zu beantworten, denn an den UV- und Infrarotgrenzen werden nicht gleichzeitig r- und b-Zellen angeregt; r-Zellen sind nicht «oktavsensibel». Das oben präsentierte vereinfachte Modell des Sehens mit disjunkten Resonanz-zonen läge einer solchen symmetrischen Sicht näher, denn die drei Koordinatenrichtungen sind dort gleichberechtigt.

Das auf der Gegenfarbentheorie aufbauende CIELAB-Farbsystem (1976) verwendet eine Darstellung der Farben gleicher Helligkeit auf einer Kreisfläche. Die Gegenfarbentheorie wird mit einem Modell der neuronalen Verarbeitung begründet.<sup>33</sup> Die Randlinie des CIELAB-Kreises ist aber nicht durch die Spektralfarben (Farben maximaler Sättigung) begrenzt. Ferner ist auch hier die Gleichabständigkeit unvollkommen.<sup>34</sup> Die optische Oktave und das

32 McAdams und Cunibile.

33 Vgl. Schläpfer, S. 36–40.

34 Vgl. Schläpfer S. 78–79. Aufgrund der zusammenhängenden, elliptischen Farbvalenzen im CIE-Dreieck kann eine Transformation, die die Ränder nicht auf sich abbildet, unmöglich Gleichabständigkeit erzeugen. Eine solche bringt nämlich durch ihre Unstetigkeit die Abstandsbeziehungen durcheinander.



Oktavphänomen in der Musik (zyklischer Anteil der Tonhöhe, Tonigkeit) haben parallel zu offensichtlicher synästhetischen Wahrnehmung bei Künstlern immer wieder Anlass gegeben, den Tonhöhen oder Tonarten in spekulativer Weise Spektralfarben zuzuordnen.<sup>35</sup>

## 5. Schlussbemerkung

Eine physiologisch relevante Klassifikation von Klängen könnte meines Erachtens für den Bereich der Datenkommunikation in Zusammenhang mit Kompressionsfragen in Zukunft durchaus handfeste Bedeutung erlangen. Insbesondere wäre auch die begrenzte Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes und deren Bedeutung für die Kommunikation zu klären. Die Klassifikation stationärer Klänge löst das Klangfarbenproblem nur zu einem kleinen Teil. Die Beschreibung von Klängen als diskrete Folgen von Fourierspektren führt geometrisch auf Netzstrukturen im Raum Zeit-Frequenz-Amplitude. Untersuchungen in dieser Richtung mit der Methode «Analysis by Synthesis» liegen von Jean-Claude Risset/David Wessel<sup>36</sup> vor. Zu hinterfragen wäre die kritiklose Anwendung der Fourier-Transformation als einzige wahrnehmungspsychologisch adäquate Perspektive zur Beurteilung von Klängen. Diese Problematik wurde bereits 1840 von August Seebeck<sup>37</sup> erkannt und verdient vor dem Hintergrund heutiger psychoakustischer Erkenntnisse eine Neubeurteilung.

er sich liess. Denn Freyer war es offensichtlich nicht darum gegangen, die Sprache der Musik in eine Bildersprache zu übersetzen oder gar Bilder aus Musik zu untermalen. Vielmehr deuteten die hochartifizialen Mittel seines Films auf die Absicht, jeden Akt der Illustration im Keim zu greifen und statt dessen auf der uneingeschränkten Autonomie der einzelnen Kunstformen zu beharren.

Dass dieses gänzlich undilaktische Konzept die Rezeption der Metamorphose nicht gerade erleichtert, liegt auf der Hand. Hinzu kommt, dass sich Freyer nicht mit den beiden Ebenen Musik und Bild begnügte, sondern auch noch die (literarische) Sprache zum Element einer gleichberechtigten künstlerischen Praxis erhoben hat. In collagierter Form folgen auch die gesprochenen Texte ihrer eigenen Gesetzmäßigkeit und verstärken jene formale Offen-

35 Karin v. Maur (Hg.), *Vom Klang der Bilder. Die Musik in der Kunst des 20. Jahrhunderts*. Ausstellung zum europäischen Jahr der Musik (6.7–22.9.1985), Staatsgalerie Stuttgart. Stuttgart: Prestel. 1985. S. 212 (Alexander Laszlo), S. 218–220 (Ivan Wyschnegradsky), S. 278 (Luigi Veronesi).

36 Jean-Claude Risset und David Wessel, «Exploration du Timbre par Analyse et Synthèse.» In: Christian Bourgois (Hg.), *Le Timbre. Métaphore pour la Composition*. Paris: IRCAM. 1991. S. 103–131.

37 Vgl. Barkowsky, S. 212–230; Hesse, S. 233–248.



