



Universität Karlsruhe

Fakultät für Informatik

Institut für Rechnerentwurf und Fehlertoleranz

Seminar 'Hören - The Art of Auditory Stream Analysis' im
Wintersemester 2006/2007

Eigenschaften Akustischer Objekte

Manuel Holtgrewe

Betreuer: Fridtjof Feldbusch

12. 12. 2006

Zusammenfassung

Eine wichtige Funktion des menschlichen Gehörs ist es, die wahrgenommenen Töne nach Zusammengehörigkeit zu Gruppieren.

Ausgehend von Bregmans Buch „Auditory Scene Analysis“ ([Bre99]) stellt dieser Text strukturiert Merkmale vor, nach denen das menschliche Gehör Töne – zu sogenannten akustischen Objekten (engl. stream) – gruppiert. Die Merkmale werden erläutert und durch die in [Bre99] beschriebenen Experimente belegt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Wie hört der Mensch?	1
1.2	Physikalische Beschreibung von Ton	2
2	Effekte - Klassifizierung von Beobachtungen	3
2.1	Das Experiment von Bregman-Campbell	3
2.2	Das Experiment von Bregman-Pinker	4
3	Merkmale in akustischen Szenen	5
3.1	Frequenz	5
3.1.1	Nähe im Frequenzspektrum	5
3.1.2	Harmonie von Tönen	6
3.1.3	Frequenz-Mikromodulation	7
3.1.4	Veränderung der Frequenz	9
3.2	Amplitude	10
3.2.1	Lautstärkenanstieg am Einsatzpunkt	10
3.2.2	Nähe in der Amplitude	11
3.2.3	Amplituden-Mikromodulation (AM)	12
3.2.4	Veränderung der Amplitude	12
3.2.5	Räumlicher Ursprung von Tönen	12
3.3	Zeit	13
3.3.1	Tonrate	13
3.3.2	Nähe in der Zeit	13
4	Zusammenfassung und Ausblick	13
A	Gesetze der Gestaltpsychologie	14
	Literatur	15

1 Einleitung

Während der Prozess des menschlichen Sehens seit langer Zeit erforscht wird ist das Erforschen der akustischen Wahrnehmung ein relativ neues Gebiet (S. 1ff)¹.

Dabei ist das Wissen über die Funktionsweise des menschlichen Hörens eine wichtige Grundlage für das Nachbilden des Prozesses im Rechner.

Bregman stellt in seinem Buch „Auditory Scene Analysis“ ([Bre99]) die Ergebnisse der Forschung auf dem Gebiet der akustischen Wahrnehmung dar. Ziel dieser Seminararbeit ist die strukturierte Zusammenstellung von wichtigen Merkmalen von Ton, die für unsere Wahrnehmung wichtig sind.

1.1 Wie hört der Mensch?

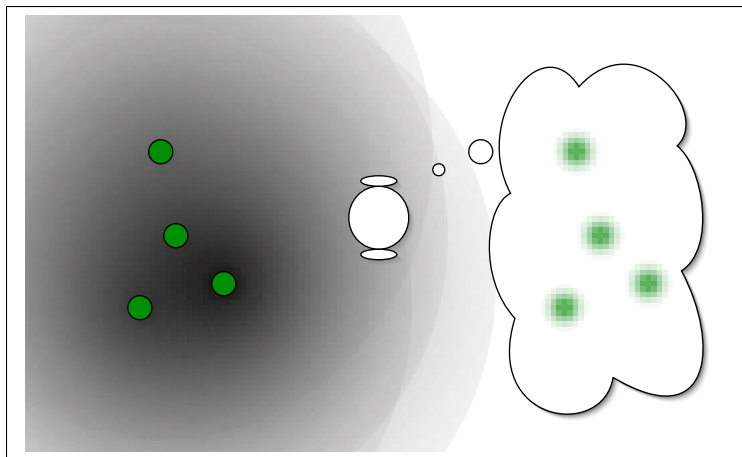


Abbildung 1: Modell des Hörprozesses

Um zu beschreiben, wie das menschliche Gehör die wahrgenommenen Schallwellen umsetzt, betrachtet Bregman folgendes Modell vom Menschen und seiner Umgebung. Dabei sind mit *Gehör* das Außenohr, Innenohr sowie der akustische Pfad im Gehirn (also der Teil des Gehirnes, der an der akustischen Wahrnehmung beteiligt ist).

Der Mensch befindet sich über der Zeit in einem dreidimensionalen Raum, seiner *Umgebung*. In der Umgebung gibt es *Ereignisse*, die Töne, also in der Luft Schallwellen erzeugen. Dies kann zum Beispiel ein zwitschernder Vogel oder das Rauschen einer entfernten Autobahn sein. Als Ereignis gilt also das, was akustisch als „ein Objekt“ wahrgenommen wird, auch wenn es durch mehrere Objekte in der Welt erzeugt wird. Die für das Hören relevanten Ereignisse bilden die *akustische Szene*.

Der Mensch kann mit seinen beiden Ohren die Schallwellen als Töne wahrnehmen. Wenn mehrere Ereignisse zur gleichen Zeit stattfinden, hört man simultan mehrere Töne.

¹Seitenangaben sind immer auf [Bre99] bezogen, Angaben von Abschnitten wie 3.1.4 immer auf den vorliegenden Text

Das menschliche Gehör schafft es, aus diesem Tongemisch die einzelnen ursprünglichen Ereignisse wieder herauszuhören. Die Töne, die das Gehör dabei einem Ereignis in der Umgebung zuordnet bezeichnet Bregman als akustisches Objekt (engl. *stream*).

Abb. 1 zeigt dieses Modell: Ereignisse (links) senden Schallwellen aus, die der Mensch mit seinen zwei Ohren wahrnimmt. Das Gehör analysiert die wahrgenommenen Töne und zerlegt sie in akustische Objekte, woraus der Mensch dann in seinem Kopf eine Beschreibung unserer Umgebung aufbauen können. Dabei ergeben sich durch Informationsverlust Ungenauigkeiten.

Bregman untersucht in [Bre99], wie das Gehör akustische Objekte findet und welche Eigenschaften des wahrgenommenen Ton es dabei ausnutzt. Betrachtete Eigenschaften sind dabei:

- Nähe von Tönen in der Frequenz, Harmonie von Tönen, gleiche Frequenz-Mikromodulation, gleiche Veränderung in der Frequenz
- Nähe in der Amplitude, Amplituden-Mikromodulation, gleiche Veränderung in der Amplitude, Räumlicher Ursprung von Tönen
- Tonrate, Nähe von Tönen in der Zeit.

1.2 Physikalische Beschreibung von Ton

Vereinfacht sind das, was Menschen als akustisch wahrnehmen Schallwellen in der Luft. Diese lassen sich als Summen von Sinuswellen beschreiben. Jede dieser Sinuswellen hat eine *Frequenz* und eine *Amplitude* (Lautstärke). Man kann die Frequenz über die Zeit in einem Diagramm wie in Abb. 2 abtragen.

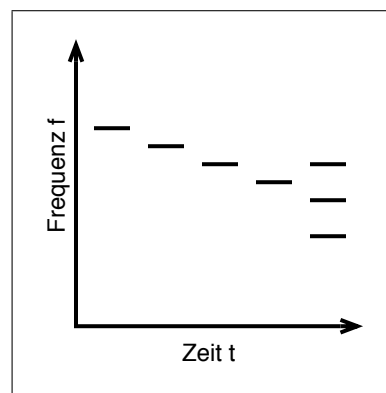


Abbildung 2: Die Frequenzen einer Tonfolge über die Zeit.

Töne lassen sich durch ihre Frequenz, Lautstärke (im Diagramm nicht dargestellt) und ihr Intervall in der Zeit beschreiben.

Dabei heißt eine einfache Sinusschwingung ein *Ton*. Die Überlagerung von Sinusschwingungen heißt *Klang* wenn sie *harmonisch* ist, also aus einem Grundton und Obertönen

besteht, deren Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Frequenz des Grundtons ist. Ist sie nicht harmonisch so heißt die Überlagerung von Sinusschwingungen *Geräusch*.

Es werden hier nur Töne und Klänge betrachtet.

2 Effekte - Klassifizierung von Beobachtungen

Um zu belegen, dass eine Eigenschaft von Tönen einen Einfluss auf die Zuordnung von Tönen zu akustischen Objekten hat, werden Experimente durchgeführt. In diesen werden Testpersonen unter kontrollierten, wiederholbaren Bedingungen Tonsequenzen vorgespielt. In einigen Experimenten können sie die Tonsequenzen beeinflussen um eine Aufgabe zu lösen (etwa: Verändere die Frequenz eines Tones, so dass sie gleich der Frequenzen eines zeitlich versetzten Tones ist). Danach werden die Personen bezüglich über ihre Wahrnehmung der Töne befragt.

Für diese Experimente nutzen Forscher wie Bregman bestimmte Phänomene in der Wahrnehmung (Bregman nennt sie „Effekte“) aus. Einführend soll auf zwei Experimente eingegangen werden, die für den Rest des Textes wichtige Effekte zeigen: Das Experiment von Bregman-Campbell und das Experiment von Bregman-Pinker.

2.1 Das Experiment von Bregman-Campbell

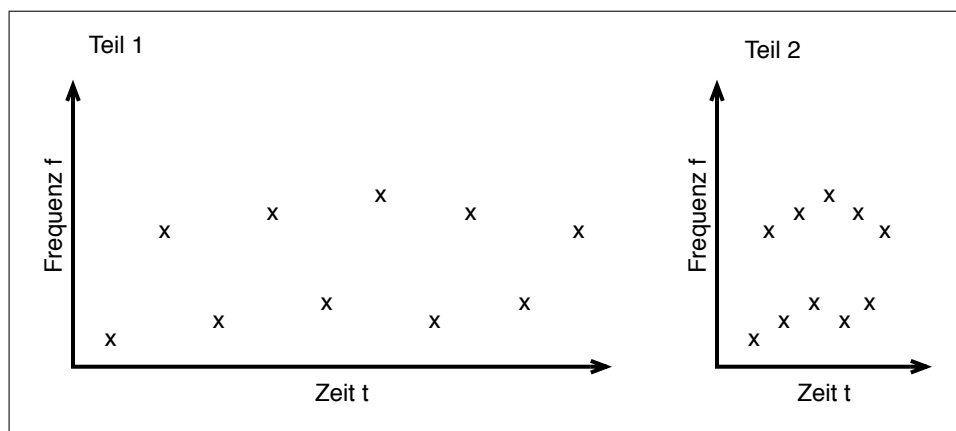


Abbildung 3: Das Experiment von Bregman-Campbell.

Bei diesem Experiment wurde den Testpersonen eine Tonfolge wie in Abb. 3 vorgespielt (S. 17f). Die Tonfolge enthält abwechselnd hohe und tiefe Töne. Wird die Tonfolge langsam (Abb. 3 Teil 1) gespielt, so erscheint sie als eine Melodie. Erhöht man die Rate (Abb. 3 Teil 2), in der die Töne abgespielt werden, dann hörten die Testpersonen zwei Melodien: Eine hohe und eine Tiefe.

Bregman nennt dies den „streaming effect“: Es wirkten Anziehungskräfte zwischen Tönen, die sich in der Frequenz nah sind, und unser Gehör fasse diese in einzelne akustische

Objekte zusammen sobald die Kräfte stark genug sind. Bregman zieht Parallelen zum *Gesetz der Nähe* aus der Gestaltpsychologie (siehe Anhang).

Findet man also Töne, die sich in einer Eigenschaft nah sind und deshalb dem selben akustischen Objekt zugeordnet werden, kann man darauf schließen, dass diese Eigenschaft (bei Bregman-Campbell die Frequenz) für die Unterscheidung von Tönen relevant ist. Analoges gilt für Eigenschaften, so dass Töne, die sich in dieser fern sind, in unterschiedliche Objekte aufgeteilt werden.

2.2 Das Experiment von Bregman-Pinker

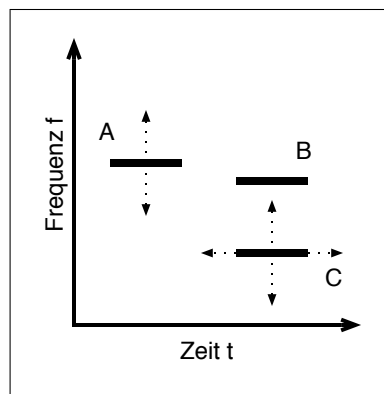


Abbildung 4: Das Experiment von Bregman-Pinker.

Abb. 4 zeigt das Experiment von Bregman-Pinker (S. 29f). Die abgebildeten Töne sind Teil einer Tonsequenz und wurden für das Experiment wiederholt abgespielt. Es gibt drei Töne A, B und C. B ist fest in Zeit und Frequenz. A konnte in der Frequenz und B in Frequenz und Zeit verschoben werden.

Liegt A in der Frequenz weit von B entfernt und fängt C gleichzeitig mit B an, so klingen B und C wie ein komplexer, „vollerer“ Ton. Diesen Effekt nennt Bregman *Verschmelzen*: Aus mehreren einfachen Tönen wird ein komplexer und man kann noch die Existenz zweier Töne feststellen. Die Testpersonen nehmen eine Sequenz eines einfachen Tons A und dem komplexen Ton BC wahr.

Liegt A in der Frequenz nah zu B und C fängt versetzt zu C an, so nehmen die Testpersonen ein akustisches Objekt wahr, in dem A ständig gespielt wird und ein anderes akustisches Objekt, das den Ton C enthält und nur jedes zweite mal auftritt. Diesen Effekt nennt Bregman das *Fangen* von Tönen (wobei A der *Fänger* ist): Ein Ton fängt einen anderen Ton aufgrund von frequentieller Nähe aus einem komplexen Ton heraus, so dass er zum gleichen akustischen Objekt gehört wie der erste.

Durch diese Experiment sieht man, dass neben der Nähe in der Zeit auch der *Anfangszeitpunkt* (engl. *onset*) ein wichtiges Merkmal von Tönen ist.

3 Merkmale in akustischen Szenen

Nachdem zwei Beispiele für wichtige Merkmale akustischer Objekte betrachtet wurden - Nähe in der Frequenz und Anfangszeitpunkt von Tönen - werden nun die in [Bre99] aufgeführten Merkmale strukturiert beschrieben. Dabei werden sie auch in ihrer Wichtigkeit verglichen und es wird betrachtet, wie sie miteinander in der Objektbildung konkurrieren.

3.1 Frequenz

Die Frequenz ist das wichtigste Merkmal von Tönen und ein Großteil der Forschung beschäftigt sich mit der Rolle der Frequenz beim Unterscheiden von akustischen Objekten.

3.1.1 Nähe im Frequenzspektrum

Das Ergebnis des Experiments von Bregman-Campbell (s. 2.1 sowie [Bre99], S. 17f) lässt sich durch das Gesetz der Nähe erklären: Durch das Erhöhen der Tonrate wird der Abstand der Töne zueinander kleiner und die Töne mit ähnlicher Frequenz „ziehen sich gegenseitig an“ und werden zu einem akustischen Objekt.

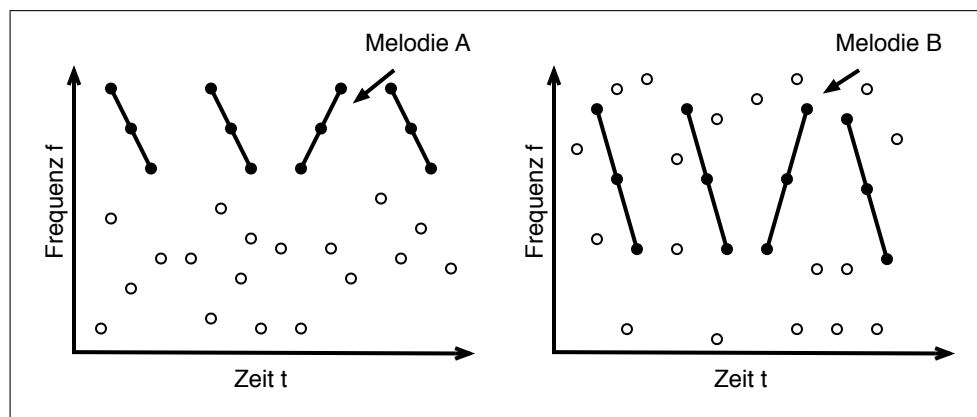


Abbildung 5: Experiment von Bregman: Heraushören von Melodien aus Störtönen.

Ein anderes Experiment von Bregman lässt sich auch mit der Nähe von Tönen in ihrer Frequenz erklären (S. 61f): Es gibt zwei Melodien A und B, die beide die Form „H-M-L—H-M-L“ haben (H ist ein hoher Ton, M ein mittlerer Ton, L ein tiefer Ton). Die Testpersonen wurden zuerst darauf trainiert, A und B von ähnlichen Melodien zu unterscheiden. Danach wurden ihnen A und B mit Störtönen vermischt vorgespielt (wie in Abb. 5 dargestellt).

Die Testpersonen sollten aus den Melodien mit Störgemisch die Melodien A und B heraushören. Dabei wurde die Tonrate einmal von langsam nach schnell und einmal von schnell nach langsam verändert.

Die Melodie A konnte besser aus den Störtönen herausgehört werden als die Melodie B. Die Ursache hierfür ist, dass die Töne von A in der Frequenz zueinander näher liegen als zu den Störtönen. Dies ist bei Melodie B nicht der Fall. Es kommt also nicht auf die

absolute Frequenznähe von Tönen zueinander an sondern vielmehr auf die *relative Nähe zueinander im Vergleich zu anderen Tönen*.

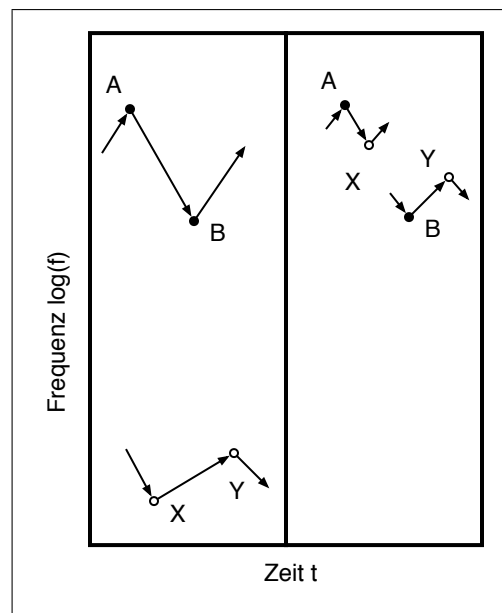


Abbildung 6: Experiment von Bregman: Gruppierung durch *relative* Nähe.

Noch deutlicher wird diese Tatsache durch ein weiteres Experiment von Bregman (S. 166f): Es gibt vier Töne A, B, X und Y. Dabei sind A und B konstant und X und Y variieren in ihrer Frequenz (Abb. 6). Sind X und Y im Frequenzspektrum „relativ“ weit von A und B (also weiter als A und B zueinander) entfernt dann hörten die Testpersonen zwei Objekte, die aus A und B bzw. X und Y bestehen (Abb. 6, linke Seite).

Liegt jedoch etwa X näher an A als A an B liegt und Y sehr nahe an C, dann werden zwei akustische Objekte wahrgenommen, die jeweils aus A und X sowie C und Y bestehen (Abb. 6, rechte Seite).

Eine Erklärung mit Hilfe der Gestaltpsychologie ist, dass die Töne anziehende „Kräfte“ besitzen. Sind zwei Töne in der Frequenz nahe genug zueinander, so binden diese „Kräfte“ die Töne zusammen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Nähe in der Frequenz einen erheblichen Einfluss auf das Gruppieren von Tönen in akustische Objekte und auf das Trennen von akustische Objekten hat. Dabei ist die *relative* Nähe in der Frequenz wichtiger als die absolute Nähe.

3.1.2 Harmonie von Tönen

Wie in 1.2 beschrieben besteht ein Klang aus einem Grundton und Obertönen, die ganzzahlige Vielfache des Grundtons sind (von 400 Hz etwa 800 Hz, 1200 Hz usw.).

Bregman und Doehring untersuchten 1984 (S. 241f), welchen Einfluss das harmonische Zusammenklingen von Tönen auf die Objektbildung hat (Abb. 7): Es wurden abwech-

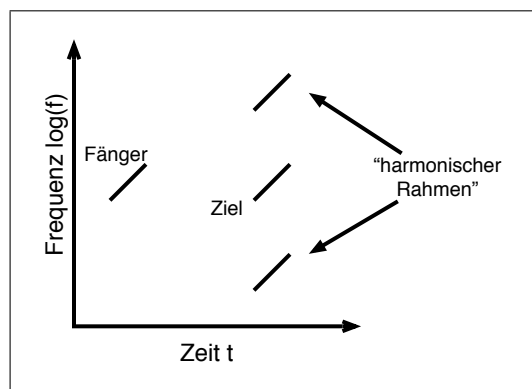


Abbildung 7: Experiment von Bregman-Doehring

selnd ein Fänger-„Glide“ und ein komplexer „Glide“ gespielt. Letzterer bestand aus drei gleitenden, ansteigenden Tönen, die zueinander auf einer logarithmischen Skala parallel lagen.

Bregman und Doehring untersuchten, welchen Einfluss die Harmonie der Töne im komplexen „Glide“ auf das Fangen des Ziels durch den Fänger hatte. Der obere und untere Rahmen-„Glide“ hatten jeweils ein Verhältnis von 1:4 - lagen also zwei Oktaven auseinander.

Lag der Zielton eine Oktave über dem unteren - gab es also ein 1:2:4 Verhältnis der gleitenden Töne - dann war der Effekt des Fangens sehr viel schwächer als wenn der Zielton etwa eine viertel Oktave vom Oktaven-Abstand abwich (Tonverhältnis 4:1.68:1).

Im Experiment von Bregman-Pinker (s. 2.2) hingegen gab es keinen Beweis, dass der harmonische Zusammenhang in dem komplexen Ton aus B und C das Fangen von B durch A oder das Verschmelzen von B und C beeinflusste (S. 241).

Bregman folgert daraus, dass zwei Töne zu wenig sind, damit Harmonie eine entscheidende Rolle beim Verschmelzen spielt. Drei Töne reichten jedoch aus.

3.1.3 Frequenz-Mikromodulation

Ein weiteres Merkmal von Tönen, das für die Zuordnung von Tönen zu akustischen Objekten sehr starken Einfluss hat ist die Mikromodulation². Ein Grund hierfür ist laut Bregman, dass Töne in der Natur nie „rein“ vorkommen. Die menschliche Stimme ist zum Beispiel immer einer Modulation unterworfen: Obwohl beim Singen eines konstanten Tons dieser als „klar“ erscheint ist er einer Mikromodulation unterworfen (S. 657).

Töne mit gleicher Mikromodulation klingen stärker verschmolzen, wie Chowning 1979 feststellte (S. 252f): Er wollte die menschliche Singstimme durch Computer nachbauen. Er fing mit einem einfachen 400 Hz Ton an und fügte harmonische Vielfache dieses Tones hinzu. Die Töne verschmolzen jedoch nicht zu einer „Stimme“. Erst als Chowning die Töne einer Mikromodulation unterwarf klangen die Töne nach einer - noch mecha-

²Mikromodulation ist das Aufbringen einer „Schwankung“ auf die Frequenz einer Schallwelle

nischen - „menschlichen“ Stimme. Er konnte den mechanischen Klang durch kleine Unregelmäßigkeiten in der Mikromodulation abschwächen, die synthetisierte Stimme klang natürlicher.

Bregman beschreibt weiter, wie der Psychologe McAdams die Auswirkung von Mikromodulation auf das Verschmelzen von Tönen (S. 253ff) untersuchte: Dieser verglich Modulation mit konstanter Rate (engl. constant rate modulation, CRM) mit Modulation mit konstanter Differenz (engl. constant difference modulation, CDM). CRM bedeutet, dass Töne durch das Multiplizieren mit einem Faktor moduliert werden, bei CDM wird ein Summand auf die Frequenzen addiert.

Als Grundlage für seine Experimente nahm McAdams einen komplexen Ton aus einem 220 Hz Grundton und 15 zu diesem harmonischen Tönen. Auf diesen komplexen Ton wandte er dann CRM und CDM an. Testpersonen wurden befragt, welcher modulierte Ton stärker aus verschiedenen Quellen klang.

90% der Testpersonen empfanden, dass die Modulation mit konstanter Differenz am wenigsten homogen klang.

Eine Begründung dafür ist, dass die CRM die Harmonien erhält. Der komplexe, harmonische Ton „200, 400, 600“ wird durch einen Faktor zum Beispiel zu „220, 440, 660“, so dass die Obertöne immer noch Vielfache des Grundtons sind. Durch CDM könnte er zum Beispiel zu „225, 425, 625“ werden. Dadurch wird der Abstand der Frequenzen und damit auch die Harmonie des Tones zerstört.

Überträgt man die Gesetze Gestaltpsychologie aufs Akustische, so kann man folgendes sagen: Das Gesetz des gleichen Schicksals (Schwanken der Frequenz um den gleichen Wert) wiegt also schwächer als das Gesetz der Ähnlichkeit (Schwanken der Frequenz, so dass harmonische Abstände erhalten bleiben).

Ein Experiment von Reynolds (S. 265) zeigt wie stark Frequenzmodulation auf die Zuordnung von Tönen zu akustischen Objekten wirkt: Der Ton einer synthetischen Oboe wurde in ungerade und gerade harmonische Teiltöne aufgeteilt. Die geraden Töne wurden auf einen Lautsprecher links in einem Raum und die ungeraden Töne auf einen Lautsprecher rechts in dem Raum gelegt.

Anfangs wurden der linke und rechte Kanal gleich mikromoduliert. Testpersonen nahmen ein akustisches Objekt wahr, das zwischen den beiden Lautsprechern seinen Ursprung zu haben schien. Dann wurden der linke und der rechte Kanal unterschiedlich moduliert und es wurden zwei verschiedene akustische Objekte wahrgenommen.

Die Mikromodulation wirkt bei der Entscheidung, zu welchem akustischen Objekt ein Ton gehört also stärker als der räumliche Ursprung und kann harmonische Töne voneinander trennen.

Bregman untersuchte die Mikromodulation noch mit einem ähnlichen Versuchsaufbau wie im Experiment von Bregman-Pinker (S. 661): Die verwendeten Töne wurden mikromoduliert. Wurden B und C unterschiedlich moduliert, so verschmolzen sie schlechter und A fing B stärker ein.

Auch im Experiment von Bregman-Halpern wirkt die Mikromodulation als ein entscheidendes Merkmal für den Zusammenhalt von Tönen (s. 3.1.4).

Zusammenfassend ist die Frequenz-Mikromodulierung mit konstanter Rate also ein sehr

wichtiges Merkmal von Tönen für das Bilden von akustischen Objekten. Sie wirkt stärker als räumlicher Ursprung oder die Harmonie von Tönen. Die Mikromodulation mit konstanter Differenz hat keinen so starken Effekt wie die mit konstanter Rate.

3.1.4 Veränderung der Frequenz

Die Änderung der Frequenz, den die Töne eines Ereignisses haben tritt in unserer Umgebung oft auf, etwa beim Anheben der Stimme am Ende eines Fragesatzes. Man kann also vermuten, dass die gemeinsame Veränderung von Tönen dazu führt, dass sie dem gleichen Objekt zugeordnet werden: Menschliche Stimmen bestehen aus komplexen Tönen, die beim oben erwähnten Anheben der Stimme gleich verändert werden.

Ein Experiment, das mit Änderung in der Frequenz arbeitet ist die Tonleiter-Illusion von Deutsch (S. 76f). Testpersonen wurde gleichzeitig eine fallende und eine steigende Tonleiter vorgespielt (Abb. 8, Teil 1).

Dabei wurde auf dem linken Ohr abwechselnd ein Ton der steigenden und ein Ton der fallenden Tonleiter gespielt. Auf dem rechten Ohr wurde jeweils der andere Ton abgespielt (Abb. 8, Teil 2). Die Testpersonen nahmen bei diesem Experiment zwei Wellen wahr: Eine hohe und eine tiefe (Abb. 8, Teil 3).

Das Experiment von Bregman-Halper beschäftigt sich mit gleitenden Tönen, die ihre Frequenz ändern und sich schneiden (S. 257ff). Testpersonen wurden gleitende Töne vorgespielt: Einer stieg in der Frequenz an und der andere fiel, wobei sie sich einmal schnitten. Die Wahrnehmung der Testpersonen war, dass sich zwei Töne aufeinanderzubewegten bis sie sich trafen. Der untere Ton bewegte sich der Wahrnehmung nach danach in der Frequenz wieder nach unten, der höhere Ton in der Frequenz nach oben (Abb. 9, Teil 1).

Bregman und Halper veränderten dann die Eigenschaften des Objekts, das aus dem oberen, nur fallenden Ton gebildet wurde indem sie ihm einen parallelen Ton hinzufügten und diesen Klang dann mikromodulierten (Abb. 9, Teil 2). In diesem Fall wurden die Objekte als durchgehend wahrgenommen, es kam nicht zum oben beschriebenen „abprallen“.

Ein weiteres interessantes Ergebnis liefert das Experiment von Bregman-Steiger (S. 110f). Hier wurde Testpersonen Töne mit sägezahnförmigen Änderungen in der Frequenz vorgespielt (Abb. 10, Teil 1). Die Testpersonen nahmen hier zwei akustische Objekte wahr: Ein Objekt, dessen Ton sich in den unteren „Zacken“ bewegt (Abb. 10, Teil 2) und eines, dass sich in den oberen Zacken bewegt (Abb. 10, Teil 3).

In den ersten zwei Experimenten kann man beobachten, dass die Nähe in der Frequenz gleichbleibende Änderung von Tönen überwiegt. Im Experiment von Bregman-Steiger sehen wir, dass sich das Gehör dafür entscheidet, nach Nähe in der Frequenz zu gruppieren statt nach gleichbleibender Veränderung. Von der visuellen Wahrnehmung des Graphen der Frequenz her hätten man beide Möglichkeiten als möglich empfunden.

Im Rahmen der Gestaltpsychologie kann gesagt werden, dass die Nähe in der Frequenz bzw. die damit verbundene Ähnlichkeit (Gesetz der Nähe, Gesetz der Ähnlichkeit) stärker bindet als das Gesetz des gleichen Schicksals.

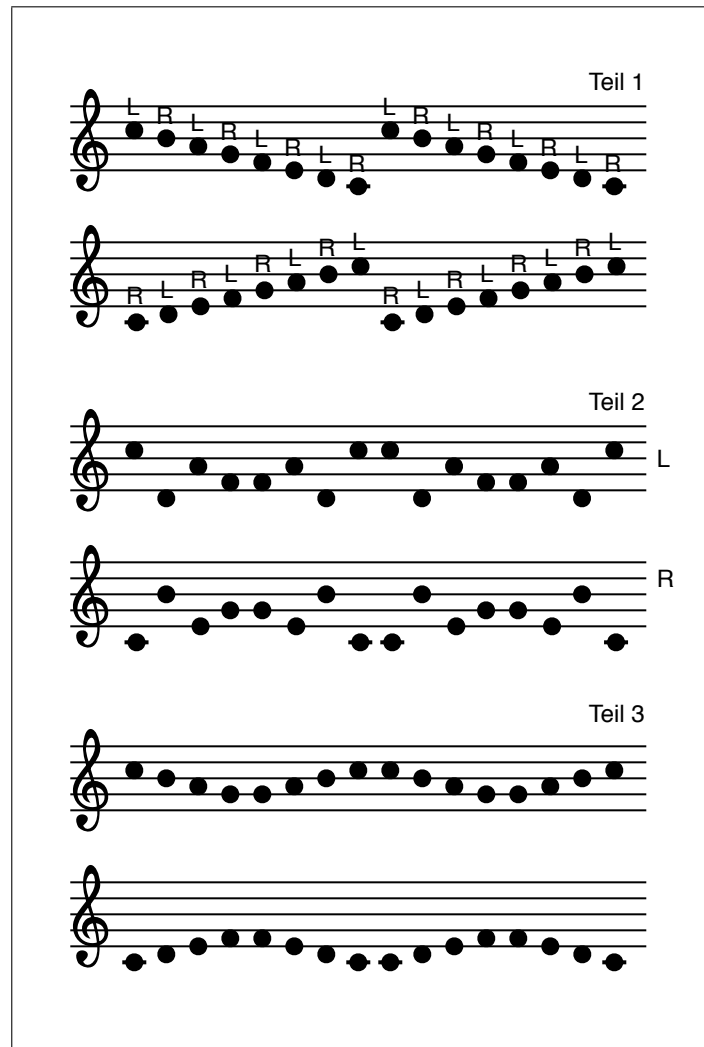


Abbildung 8: Die Tonleiterillusion von Deutsch

3.2 Amplitude

3.2.1 Lautstärkenanstieg am Einsatzpunkt

Wie im Experiment von Bregman-Pinker zu sehen ist der Zeitpunkt, an dem ein Ton anfängt wichtig. Fängt er in der Zeit nah mit einem anderen an, so wird es wahrscheinlicher, dass die zwei Töne verschmelzen. Es stellt sich nun die Frage, was als Tonanfang gilt.

Van Noorden führte hierzu ein Experiment durch (S. 71): Ein konstanter, durchgehender Ton wurde in der Amplitude moduliert und die Rate der Modulation verändert. Bei langsamer Modulationsrate hörten Testpersonen einen Ton, der abwechselnd leiser und lauter wurde. Bei hoher Modulationsrate hörten sie die Stücke, die durch die „Lautstärkentäler“ getrennt wurden, als einzelne Töne.

Entscheidend für das wahrnehmen eines neuen Tons ist also, wie stark ein Ton in

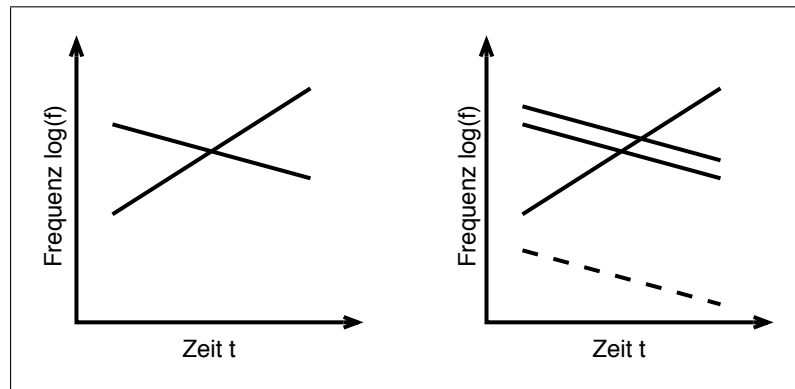


Abbildung 9: Das Experiment von Bregman-Halpern

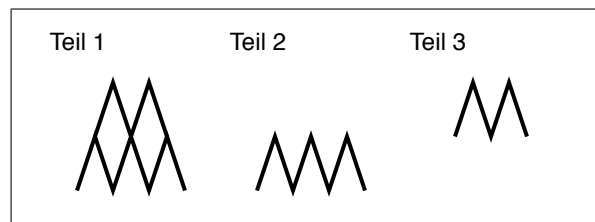


Abbildung 10: Das Experiment von Bregman-Steiger

der Lautstärke ansteigt. Dass gemeinsam beginnende Töne gleichzeitig aufhören ist für die Wahrnehmung als der Töne als zu einem Objekt gehörend nicht sehr wichtig. Bregman gibt hier das Anschlagen und Ausschwingen einer Gitarrensaite als Beispiel. Beim hier entstehenden Ton fangen alle beteiligten Teiltöne gleichzeitig an, klingen jedoch unterschiedlich schnell wieder ab.

3.2.2 Nähe in der Amplitude

Das Gesetz der Nähe ist in der Gestaltpsychologie wichtig für das Gruppieren von visuellen Objekten. Im Experiment von Bregman-Campbell wurde gezeigt, dass die Nähe in der Frequenz für das Wahrnehmen von akustischen Objekten eine wichtige Rolle spielt. Es soll nun untersucht werden, ob die Nähe in der Amplitude einen ähnlichen Einfluss hat.

Bregman beschreibt folgendes Experiment von van Noorden (S. 126): Es werden Töne in der gleichen Frequenz jedoch abwechselnd ein lauter und ein leiser gespielt. Die Testpersonen wurden befragt, ab welchem Lautstärkeunterschied sie zwei Objekte wahrnehmen konnten. Dies war ab einem bestimmten Unterschied der Fall.

Die Trennung von Objekten durch den Unterschied in der Amplitude hält Bregman allenfalls für schwach und sekundär. Außerdem seien sie nur schwer untersuchbar: Würde man die Tonrate zu sehr erhöhen, so würde der *Maskierungseffekt*³ die Ergebnisse unbrauchbar

³Wird ein lauter Ton sehr kurz vor einem leisen Ton gespielt, so maskiert er diesen und der leise Ton ist nicht mehr wahrnehmbar.

machen.

3.2.3 Amplituden-Mikromodulation (AM)

Die Frequenz-Mikromodulation ist ein wichtiger Faktor beim Zuordnen von Tönen zu einem Objekt. Ist dies auch der Fall bei der Amplitudenmodulation?

Die AM ist etwa bei der Unterscheidung von Stimmen, die gleichzeitig sprechen, ein wichtiges Merkmal (S. 265ff). Zwei unterschiedliche Stimmen weisen in Frequenzbereichen eine unterschiedliche AM auf. Der Aufbau unseres Gehörs - genauer der Basilarmembran - erlaubt es nun, die beiden Stimmen voneinander zu trennen (S. 265).

Bregman erweiterte das Experiment von Bregman-Pinker um AM, um ihren Einfluss auf das Verschmelzen von B und C sowie das Fangen von B durch A zu erforschen (S. 271f). Er modulierte A, B und C um jeweils 100Hz und variierte die Modulation von C um 5Hz nach oben und unten.

Werden unterschiedliche Amplitudenmodulationen für B und C gewählt, so verschmelzen B und C schwächer. Der Ton A scheint den Ton B stärker einzufangen. Die Wirkung der Amplitudenmodulation war jedoch schwächer als bei der Frequenzmodulation.

3.2.4 Veränderung der Amplitude

Neben der Veränderung durch eine Mikromodulation kann man auch eine Änderung der Amplitude in nur eine Richtung (also das lauter bzw. leiser mit gleicher „Steigung“ werden) betrachten.

Obwohl es plausibel ist, dass die gleiche Veränderung der Amplitude das Zusammenfassen Tönen zu gleichen akustischen Objekten begünstigt, gibt es dafür noch keinen experimentellen Beweis (S. 281ff). Es scheint so, dass der Grad der Veränderung der Lautstärke während Töne gespielt werden nicht sehr ausschlaggebend sind.

Einzig der Zeitpunkt des Einsetzens - also eine Veränderung der Lautstärke von Null auf einen positiven Wert - scheint wichtig zu sein (siehe Experiment von Bregman-Pinker).

3.2.5 Räumlicher Ursprung von Tönen

Das „Richtungshören“ von Menschen hängt zum einem von der Verzögerung vom rechten zum linken Ohr als auch von der unterschiedlichen Lautstärke in linkem und rechten Ohr ab. Ist ein Ton links lauter als rechts, so wird er als von links kommend wahrgenommen.

In der Technik wird das räumliche Orten des Ursprungs von Tönen oft eingesetzt, um sie in Objekte zu teilen (S. 75). Es funktioniert zuverlässig und ist einfach umzusetzen.

Vom menschlichen Gehör wird der Ursprung eines Tons nur als unterstützendes Merkmal verwendet. Dies merkt man schon daran, dass Stereo-Ton viel klarer klingt als die gleiche Aufnahme in Mono. Es wurde außerdem festgestellt, dass es einfacher ist, sich Worte zu merken, wenn sie aus unterschiedlichen Richtungen zu kommen scheinen (S. 300).

Die Richtung, aus der ein Ton kommt, wird jedoch für die Objekttrennung leicht vernachlässigt: Etwa bei Schwarz' Tonleiterillusion (S. 76f) wiegt die Nähe in der Frequenz stärker als die Richtung, aus der ein Ton kommt.

3.3 Zeit

Die Dimension Zeit unterscheidet sich von der Frequenz und Amplitude darin, dass sie konstant verläuft und man sie daher z.B. nicht wie die Frequenz modulieren können. Es soll jedoch betrachtet werden, welchen Effekt die Tonrate und die Nähe in der Zeit auf die Bildung akustischer Objekte haben.

3.3.1 Tonrate

Die Tonrate (also wie viele Töne in einem gegebenen Zeitintervall gespielt werden) ist für die Bildung von akustischen Objekten entscheidend. In vielen Experimenten wurde sie verändert und erst ab einer bestimmten Tonrate trat der Effekt der Objekttrennung auf.

So führte die Erhöhung der Tonrate im Experiment von Bregman-Campbell dazu, dass sich hohe und tiefe Töne voneinander trennten und sich zwei verschiedene akustische Objekte bildeten.

Es wurde bis jetzt nicht untersucht, welche Abstände für die Tonrate ausschlaggebend sind (etwa: von Anfangszeitpunkt zu Anfangszeitpunkt oder von Zeitpunkt des Aussetzen bis zum Anfangszeitpunkt eines anderen Tons). Im Experiment von Bregman-Pinker wurde festgestellt, dass der Anfangszeitpunkt der Töne für das Verschmelzen gleichzeitiger Töne wichtig ist. Es läge nahe, die Tonrate an den Intervallen der Differenz der Einsatzzeitpunkte festzumachen.

Mehrere Experimente belegen, dass die Intervalle zwischen den Einsatzzeitpunkten wichtig ist (S. 65ff). Dabei ist unklar, ob der Abstand zwischen Tönen in gleichen oder unterschiedlichen akustischen Objekten der entscheidende ist.

3.3.2 Nähe in der Zeit

Ein weiterer Aspekt ist die Nähe von Tönen in der Zeit (S. 196f). Wenn Töne in der Zeit nah zueinander liegen, werden sie eher gemeinsam gruppiert. Dabei ist der *relative* Abstand zueinander wichtig.

Töne werden sowohl gruppiert, wenn man den Abstand in der Zeit zwischen zu gruppierende Tönen vergrößert als auch wenn man den Abstand zwischen den Tönen innerhalb einer Gruppe verkleinert.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Durch Beobachtung von Effekten und Auswerten von Experimenten können viele Merkmale gefunden werden, die zur Zuordnung von Tönen zum gleichen akustischen Objekt führen. Dabei konkurrieren die beschriebenen Merkmale miteinander bei der Bildung von akustischen Objekten. Es gibt wichtigere und unwichtigere Merkmale:

Die wichtigste „Dimension“ von Ton für die akustische Objektbildung ist die Frequenz. Hier sind die stärksten Merkmale die Lokalität im Frequenzspektrum und CR-Mikromodulation. Wichtig in der Zeit sind die Verschiebung im Einsatz der Töne sowie

die Tonrate. Der Lautstärke von Tönen kommt eine geringere Rolle zu: Das wichtigste Merkmal ist hier der räumliche Ursprung von Tönen, dieses ist im Gegensatz zu anderen Merkmalen - wie etwa der Frequenzmodulation - weniger wichtig.

Wenn Töne aufgrund ihrer Nähe in einer Dimension gruppiert werden, so ist die relative Nähe im Vergleich zu anderen Tönen wichtig. Für den absoluten Unterschied zweier Töne ist nur wichtig, dass es „glaubhaft“ ist, dass sie zusammen gehören: Er darf nicht zu groß sein.

Bei der Betrachtung der Merkmale muss man sich immer im Klaren sein, dass „nah“ und „ähnlich“ immer vom Individuum abhängt, dass die Töne wahrnimmt. Neben physiologischen Unterschieden spielt vor allem auch die Übung eine große Rolle beim Zuordnen von Tönen zu und dem erkennen von akustischen Objekten.

Die in diesem Text genannten Merkmale von Tönen, die für die Objektbildung wichtig sind, ist nicht als vollständig anzusehen, sie fasst aber die wichtigsten in [Bre99] beschriebenen Merkmale zusammen. [Bre99] beschreibt auch nur den aktuellen Stand der Forschung. Vieles ist noch unerforscht, so ist zum Beispiel noch ungeklärt, wie das Gehör Geräusche wie das Zerreißen von Papier wahrnimmt.

Anhang

A Gesetze der Gestaltpsychologie

Die folgende Liste der Gesetze der Gestaltpsychologie stammt aus [Wik].

- *Gesetz der Prägnanz* – Es werden bevorzugt Gestalten wahrgenommen, die sich von anderen durch ein bestimmtes Merkmal abheben.
- *Gesetz der Nähe* – Elemente mit geringen Abständen zueinander werden als zusammengehörig wahrgenommen.
- *Gesetz der Ähnlichkeit* – Einander ähnliche Elemente werden eher als zusammengehörig erlebt als einander unähnliche.
- *Gesetz der Kontinuität* – Reize, die eine Fortsetzung vorangehender Reize zu sein scheinen, werden als zusammengehörig angesehen.)
- *Gesetz der Geschlossenheit* – Linien, die eine Fläche umschließen, werden unter sonst gleichen Umständen leichter als eine Einheit aufgefasst als diejenigen, die sich nicht zusammenschließen (D. Katz, Gestaltpsychologie, 1969). [...]
- *Gesetz des gemeinsamen Schicksals* – Zwei oder mehrere sich gleichzeitig in eine Richtung bewegend Elemente werden als eine Einheit oder Gestalt wahrgenommen.

- *Gesetz der fortgesetzt durchgehenden Linie* – Linien werden immer so gesehen, als folgen sie dem einfachsten Weg. Kreuzen sich zwei Linien, so gehen wir nicht davon aus, dass der Verlauf der Linien an dieser Stelle einen Knick macht.

Literatur

[Bre99] Albert S. Bregman. *Auditory Scene Analysis*. MIT Press, paperback edition, 1999.

[Wik] Wikipedia. Gestaltpsychologie. <http://preview.tinyurl.com/yzh4d3>. Zugriff: 8. 12. 2006, 15:26.