

Seminararbeit

VBAP

im

IEM CUBE

Alex Falkensteiner
alef@sbox.tugraz.at
MatNr. 0330450

Seminararbeit [Algorithmen in Akustik und Computermusik 02](#)
Wintersemester 2008/09
Betreuer: Franz Zotter



1 Einleitung

Im Zuge dieser Seminararbeit sollte das Vector Base Amplitude Panning studiert, implementiert und im Hörversuch getestet werden. Für die Implementierung erwies sich das Programm Pure Data als sehr geeignet. Im Folgenden werden die Grundlagen, Durchführung und die Erkenntnisse zu dieser Seminararbeit dargeboten, die mir als Student der Telematik wertvolle Einblicke in die räumliche Klangwiedergabe und ihren offenen Forschungsfragen geboten haben.

2 Grundlagen der Stereophonie

In der Stereophonie gibt es laut [Blauert] im Wesentlichen zwei Verfahren die unabhängig oder in Kombination eingesetzt werden. Zum einen werden Pegel, zum anderen Laufzeiten moduliert. Die Verfahren basieren natürlich auf den Erkenntnissen der akustischen Lokalisierung des menschlichen Gehörs, welches mit den zwei Ohren zu weit mehr fähig ist, als man denken würde.

Das Vector Base Amplitude Panning moduliert prinzipiell nur Amplituden; und zwar frequenzunabhängig. Die Modulation wurde von der Stereophonie übernommen und für den dreidimensionalen Fall implementiert.

Die interauralen Zeitdifferenzen können nur mit Kopfhörern sauber erzeugt werden und sind somit nicht gut für die Anwendung mit mehreren Lautsprechern geeignet. Obschon man Laufzeiten sehr wohl beachten und positiv beeinflussen kann (siehe Abschnitt *Laufzeitkorrektur*).

Für diese Arbeit relevant sind Pegel- und Laufzeitmodulation. Das Gehör wertet bezüglich diesen nur gut erkennbar Merkmale aus: die Unterschiede der beiden Ohrsignale, interaurale Differenzen.

2.1 Interaurale Laufzeitdifferenz

Dieser und der folgende Abschnitt beschreibt die Grundlagen anhand des Buches [Blauert].

Das räumliche Hören beruht stark auf der Auswertung der Ohrbezogenen Laufzeitdifferenzen (ITD = engl. *Interaural time difference*). Während bei durchschnittlicher Kopfbreite eine maximale Laufzeitdifferenz von ca. 0.63 ms auftreten kann, ist das menschliche Gehör in der Lage bereits eine Differenz von 10 μ s wahrzunehmen. Aus der Zeitspanne zwischen den beiden Ereignissen kann der Azimut der Quelle bestimmt werden (die interaurale Zeitdifferenz wird nicht von der Elevation einer Geräuschquelle beeinflusst). Diese Lösung ist zwar zweideutig (vorne/hinten), und zur genaueren Bestimmung werden noch weitere Informationen benötigt, jedoch kann je nach Signalform die Richtung mit diesen Daten schon sehr genau bestimmt werden. Bei mehr als 0.63 ms interauraler Laufzeitdifferenz

VBAP im IEM Cube

verringert sich der Effekt der seitlichen Auslenkung deutlich und ab ca. 0.8 bis 1 ms bleibt das Hörerlebnis unverändert.

Zu beachten gilt, dass ein Signal mit 90° Schalleinfall nicht ohne frequenzabhängige Filterung am gegenüberliegenden Ohr ankommt, die interaurale Phasenlaufzeit also in Wirklichkeit nicht einfach nur zeitverschoben ist (HRTF).

Das nachfolgende Beispiel zeigt ein periodisches Signal mit einer interauralen Laufzeitdifferenz von Δt_1 bzw. Δt_2 , je nach Interpretation.

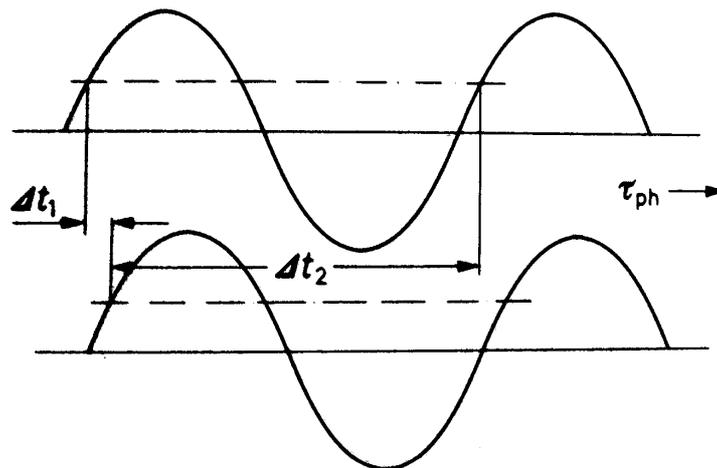


Bild 1: Zweideutige Interpretation der Laufzeitdifferenz

Die Nervenzellen im Ohr triggern immer bei ansteigender Schalldruckwelle. Diese Zweideutigkeit wird umgangen, indem die geringere Differenz dominiert, d.h. die Schallquelle wird näher der Medianebene vermutet. Ein Versuch mit einem 600 Hz Ton zeigt, dass zweideutige Laufzeitdifferenzen zwei Hörereignisse bildet, wenn diese sich in ihrem Betrag ähneln, also kein dominanter Wert ausfindig gemacht werden kann. Auch geübte Zuhörer vermuten die Quelle abwechselnd oder gleichzeitig links, rechts oder sogar mittig. Solange die Frequenz 800 Hz nicht überschreitet bzw. die halbe Periodendauer 0.63 ms nicht unterschreitet, kann die volle seitliche Auslenkung richtig interpretiert werden. Darüber hinaus sinkt die maximale Auslenkung auf

$$\tau_{ph} = \frac{T}{2}$$

Bei nicht reinen Tönen treten diese Effekte nicht auf, weil das Gehör, nach der Auswertung der einzelnen Spektralbereiche, den Verlauf der Hüllkurven auswertet (Bild 2).

VBAP im IEM Cube

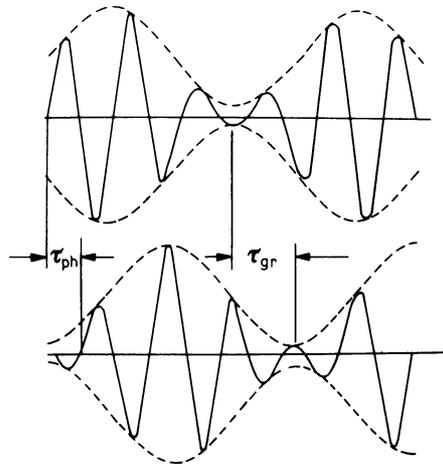


Bild 2: Träger-schwingung und Hüllkurve

Interaurale Zeitdifferenzen können mit im Raum verteilten Lautsprechern nicht direkt erzeugt werden, dazu benötigt man Kopfhörer. Man kann aber, mit dem Wissen was sie hervorrufen, wenigstens die Zeitdifferenzen bezüglich der einzelnen Lautsprecher beeinflussen, um unerwünschte Effekte, welche obigen ähneln vorzubeugen.

2.2 Interaurale Pegeldifferenz

Mit interauraler Pegeldifferenz (ILD = eng. *Interaural level difference*) bezeichnet man den Unterschied bezüglich der Lautstärke zwischen beiden Ohren. Die Lokalisierung ist auch in diesem Fall frequenzabhängig, wie im Versuch gezeigt werden konnte.

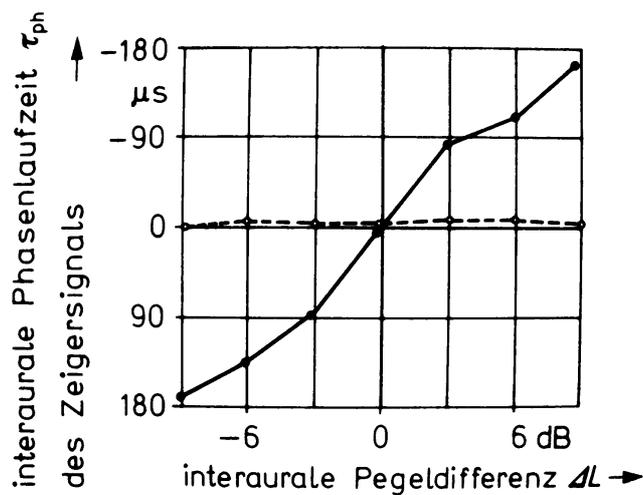


Bild 3: Versuch ILD

VBAP im IEM Cube

Ein Referenzsignal mit bestimmter Richtung, generiert mittels Laufzeitdifferenz wurde vorgegeben und die Versuchsperson musste ein Signal erzeugt mittels Pegeldifferenz danach ausrichten. Wie im Diagramm zu sehen ist (durchgezogene Linie), variiert die erforderliche Pegeldifferenz je nach Frequenz des Signals, um dem mittels gleich bleibender Laufzeitdifferenz erzeugtem zu entsprechen. Um 2000 Hz ist die erforderliche Pegeldifferenz am geringsten und steigt gering bzw. stark nach höheren bzw. niedrigen Frequenzen hin an.

Ein anderes Phänomen tritt bei Signalen mit Frequenzanteilen unter ca. 1600 Hz auf: geübte Versuchspersonen stellen ein zweites Hörereignis fest (gestrichelte Linie Bild 3). Ein Hörereignis verschiebt sich mit sich ändernder Pegeldifferenz seitlich, während das zweite in der mittigen Position bleibt.

Im Unterschied zur interauralen Zeitdifferenz, die mit steigendem Pegel eine immer genauere Lokalisierung zulässt, ist die Lokalisierungsunschärfe bei interauralen Pegeldifferenzen für sehr leise und sehr laute Signale höher. Demnach zu schließen hat das Gehör einen Arbeitsbereich, in dem Pegelunterschiede genauer erkannt werden.

Zudem muss noch gesagt werden, dass die Lokalisierung mittels Pegeldifferenzen zeitvariant ist. Das Gehör passt sich nämlich lauten Pegeln aktiv an indem sie gedämpft werden. Diese Dämpfung passiert nach längere Dauer eines Geräusches und wird Adaption oder Ermüdung genannt. Geschieht dies auf beiden Ohren unterschiedlich stark, verfälscht es den interauralen Pegelunterschied. Wenn der interaurale Pegelunterschied jedoch permanent ist, lernt das Gehör der Verfälschung entgegenzuwirken.

Signale mit unterschiedlichen Pegeln und gleicher Laufzeit können, ohne das Signal zu verzerren, überlagert werden. Darauf beruht sowohl die Pegeldifferenzstereofonie, als auch VBAP, denn Schluss endlich werden die verschiedenen Lausprechersignale, an beiden Ohren als ein gemeinsames Hörereignis wahrgenommen.

3 Vector Base Amplitude Panning

Bei VBAP wird der Ansatz der Stereophonie auf eine Oberfläche übertragen. Die Lautsprecher positioniert man in der Regel an der Oberfläche einer Kugelform, das System ist dem gegenüber aber durchaus flexibel. Wichtig ist, dass eine Oberfläche um den gewünschten Ort des Abhörplatzes aufgespannt wird.

Dabei wird eine Fläche immer aus drei benachbarten Lautsprechern, die ein Dreieck aufspannen gebildet. Innerhalb dieses Dreiecks können unter Verwendung ausschließlich dieser drei Lautsprecher virtuelle Quellen Positioniert werden. Das Lautsprecher-Dreieck wird nach der geringsten Entfernung zur virtuellen Quelle ausgewählt.

Es ist sinnvoll, die gesamte von den Lautsprechern aufspannte Fläche breits im Vorfeld in möglichst kleine Dreiecke einzuteilen, um die Berechnung zu beschleunigen. Wenn die Dreiecke die ganze Fläche abdecken und sich nicht überlappen, ist jedem beliebigem Punkt ein Lautsprecher-Tripel zugewiesen.

3.1 Triangulierung

Die genannte Einteilung in Dreiecke nennt man Triangulierung. Sie ist in vielen Fällen trivial, da die Lautsprecher meist schon an ihren fixen Plätzen stehen und der Raum, in dem ein solches System zum Einsatz kommt erfahrungsgemäß konvex ist. Aber die optimale Triangulierung einer allgemeinen Punktmenge wie wir sie mit im Raum verteilten Lautsprechern haben ist ein interessantes und anspruchsvolles Problem in der Geometrie, dessen Komplexitäts-Status noch nicht einmal bekannt ist. Optimal bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Unterteilung in Dreiecke unter Minimierung der Summe der damit entstehenden Diagonalen (oder auch Summe der Umfänge der Dreiecke) erfolgt.

Die Triangulierung der Lautsprecher im Cube sieht optimaler Weise so aus:

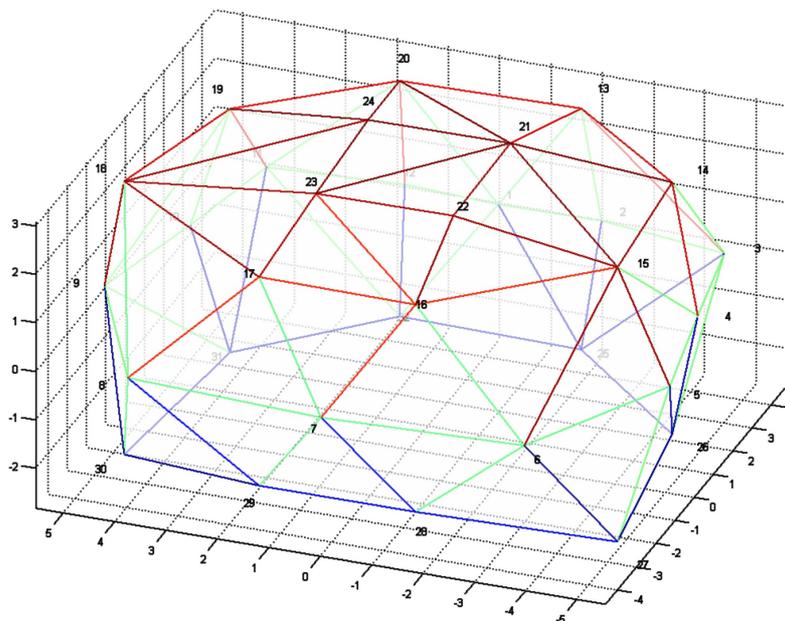


Bild 4: Triangulierung der Lautsprecher im IEM Cube

Ein zu empfehlender Algorithmus ist die Delaunay-Triangulierung, siehe [Wikipedia].

3.2 Berechnung

Grundlage für Abschnitt 3.2 und 3.3 ist der Artikel [Pulkki].

Wenn man nun einen Punkt auf einem der definierten Dreiecke gegeben hat und eine virtuelle Quelle dort positionieren will, muss man die dazugehörigen Lautsprecher an den Ecken des Dreiecks mit den jeweils genau abgestimmten Pegel beschalten.

VBAP im IEM Cube

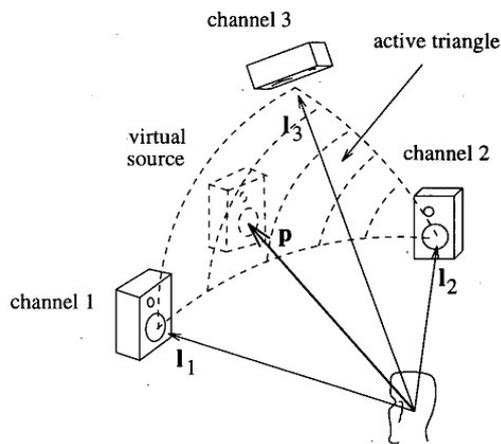


Bild 5: Virtuelle Quelle im aktiven Dreieck

Genau genommen kann die virtuelle Quelle überall auf der Halbgeraden vom Zuhörer in die Richtung der Quelle liegen, für die Berechnung nimmt man jedoch den Durchstoßpunkt des Strahls mit dem aktiven Dreieck. Für die Berechnung der drei Verstärkungsfaktoren benötigen wir die genaue Position der Lautsprecher (I_1, I_2, I_3) und die Position der virtuellen Quelle (p). Unter der Annahme, dass sich der Zuhörer im mathematischen Nullpunkt befindet können wir die Positionen direkt als Vektoren anschreiben. Andernfalls muss auch diese Position bestimmt werden und von den anderen Koordinaten subtrahiert werden um so die Vektoren in den Ursprung zu verschieben. Außerdem müssen die Vektoren normiert werden. Die darauf folgende Berechnung ist eine einfache Koordinatentransformation. Bild 6 zeigt die Berechnung für den zweidimensionalen Fall.

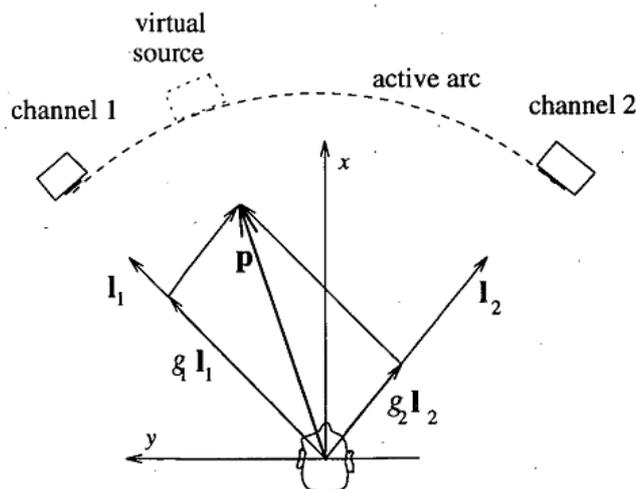


Bild 6: Koordinatentransformation im zweidimensionalen Fall

Die neuen Koordinaten und gleichzeitig auch die Verstärkungsfaktoren der Lautsprecher sind g_1 und g_2 . Die Berechnung für den dreidimensionalen Fall wird in der Matrixschreibweise durchgeführt:

VBAP im IEM Cube

Seien l_1 , l_2 und l_3 die Einheitsvektoren der drei ausgewählten Lautsprecher und p der Einheitsvektor der virtuellen Quelle (wie im Beispiel von Bild 5). Man schreibt p als Linearkombination von l_1 , l_2 und l_3 an:

$$p = g_1 \cdot l_1 + g_2 \cdot l_2 + g_3 \cdot l_3$$

Das kann man dann, die Lautsprecher als Matrix zusammengefasst so anschreiben:

$$p^T = g \cdot L_{123}$$

Umgeformt auf den gesuchten Vektor p

$$g = p^T \cdot T_{123}^{-1}$$

hat man schließlich ein Ergebnis, sofern L invertierbar ist. L ist invertierbar wenn die drei Vektoren (Koordinaten der Lautsprecher) einen dreidimensionalen Raum aufspannen. Bei näherer Überlegung erkennt man, dass drei Lautsprecher, die in einer Ebene mit den Zuhörer liegen, auch keinen räumlichen Klang erzeugen können. Die Gleichung ist also lösbar, wenn die Lautsprecheranordnung sinnvoll gewählt wurde. Die Faktoren g sollten noch mit folgender Gleichung skaliert werden:

$$g^{scaled} = \frac{\sqrt{G_g}}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2}}$$

3.3 Eigenschaften

Es ergeben sich drei spezielle Konfigurationen:

- 1) Wenn die virtuelle Quelle in der gleichen Richtung wie ein Lautsprecher liegt, ist nur dieser eingeschaltet und alle anderen aus.
- 2) Wenn die virtuelle Quelle in einer Ebene mit zwei Lautsprechern und dem Zuhörer liegt bleibt der dritte Lautsprecher ausgeschaltet.
- 3) Wenn die virtuelle Quelle auf dem Strahl durch die Mitte des aktiven Dreiecks liegt sind alle drei Lautsprecher auf den gleichen Pegel eingestellt.

Die obigen Punkte zeigen, dass VBAP immer die höchstmögliche Schärfe für die gegebene Lautsprecherkonfiguration liefert.

Außerdem kann die virtuelle Quelle nie außerhalb des aktiven Dreiecks positioniert werden, was bedeutet, dass der maximale Fehler in der Lokalisierung proportional zu der Größe des Dreiecks ist. Als direkte Folge darauf kann man den Lokalisierungsfehler mit Lautsprecheranzahl und -verteilung unmittelbar beeinflussen: je dichter die Lautsprecher positioniert sind, desto genauer die Lokalisierung.

In der Praxis musste dann jedoch, wie in der Auswertung sichtbar wird, festgestellt werden, dass bei mancher Anordnung die virtuelle Quelle außerhalb des aktiven Dreiecks lokalisiert wird. Dies hängt auch damit zusammen, dass die sichtbaren Lautsprecher die Versuchspersonen beeinflussen.

4 Ergänzungen

Wie bereits erwähnt, können die Lautsprecher beliebig im Raum verteilt werden. Natürlich ist es sinnvoll, um der Praxis zu genügen, die Lautsprecher an den Abgrenzungen eines mehr oder weniger kubischen Raumes zu montieren. In diesen Fällen, aber besonders in verwinkelten Räumen ist zu beachten, dass unterschiedlich weit entfernte Geräuschquellen sowohl mit niedrigerem Pegel, als auch später wahrgenommen werden. Genau die gleichen Effekte treten auch dann auf, wenn sich der Zuhörer im Raum bewegt. Das Signal der drei Lautsprecher soll für den Hörer aber zu einem einzigen Hörereignis zusammenschmelzen, sodass die virtuelle Quelle eindeutig lokalisiert wird. Dadurch, dass sich die frei angeordneten Lautsprecher unterschiedlich beeinflussen ist es nur begrenzt möglich, dem Hörer das Gefühl zu geben, er höre nur ein Geräusch, wo in Wirklichkeit drei sind. Einige Korrekturen können aber einfach und effizient durchgeführt werden, sofern die Entfernungen der einzelnen Lautsprecher zum Zuhörer bekannt sind.

4.1 Pegelanpassung

Der Pegel (Schalldruckpegel), der als Lautstärke empfunden wird, nimmt mit der Entfernung proportional ab:

$$p \sim \frac{1}{r}$$

Die Bekannte Entfernung muss also zur Wiedergabeamplitude dazu multipliziert werden, um den Effekt zu kompensieren. Wenn der Hall der Umgebung mit einbezogen wird, gilt die obige Formel aber nur eingeschränkt. Im Direktfeld, wo die direkten Schallquellen lauter als die reflektierten Schallquellen sind, gilt das Gesetz noch, je größer die Entfernung desto größer werden aber die Reflexionen der Umgebung und die Formel gilt nur noch eingeschränkt bzw. bleibt außerhalb des Hallradiuses (Direktschall und Reflexionen gleich laut) annähernd konstant. Da der Hallradius aber nicht ermittelbar ist, weil er von der Geometrie und Beschaffenheit des Raumes abhängt, bleibt man bei der vereinfachten proportionalen Beziehung.

Der Abstand der Lautsprecher zueinander ist in der Regel relativ klein verglichen mit dem Abstand der Lautsprecher zum Hörer. Daraus resultiert, dass das obige Gesetz für alle drei Lautsprecher einen Amplitudenfaktor ergibt, der für alle drei Lautsprecher in der gleiche Größenordnung liegt.

Die Pegelanpassung und dessen Auswirkungen konnten im Hörversuch nicht ausreichend untersucht werden, um nähere Aussagen zu treffen.

4.2 Laufzeitkorrektur

Die Schallgeschwindigkeit bestimmt die Ausbreitung der Schallwellen und hängt vom Medium ab.

VBAP im IEM Cube

$$c = \lambda \cdot f$$

Im nicht dispersiven Medium, wie der Luft, hängt die Geschwindigkeit nicht von der Frequenz ab. Die Wellenlänge ändert sich

Für Luft bei 20°C nimmt man generell eine Schallgeschwindigkeit von 343m/s an. Eine weiter entfernte Schallquelle wird folglich korrigiert mit:

$$v = \frac{s}{t} \rightarrow t[\text{sec}] = \frac{s[m]}{343}$$

Durch die Laufzeitkorrektur werden unerwünschte Effekte wie im Abschnitt Laufzeitdifferenz beschrieben kompensiert. Auch hier konnte aufgrund des mangelnden Testumfangs nicht herausgefunden werden, in wie weit diese Korrektur relevant ist.

Die Laufzeitdifferenz beträgt bei einem Meter Entfernungsdifferenz 2.9 ms. Das Gehör ist sensibel genug um eine derart hohe Differenz zu erkennen. Jedoch muss beachtet werden, dass diese Differenz nicht interaural ist, sondern ein Offset für beide Ohren. Folgendes Beispiel soll die Problematik erklären.

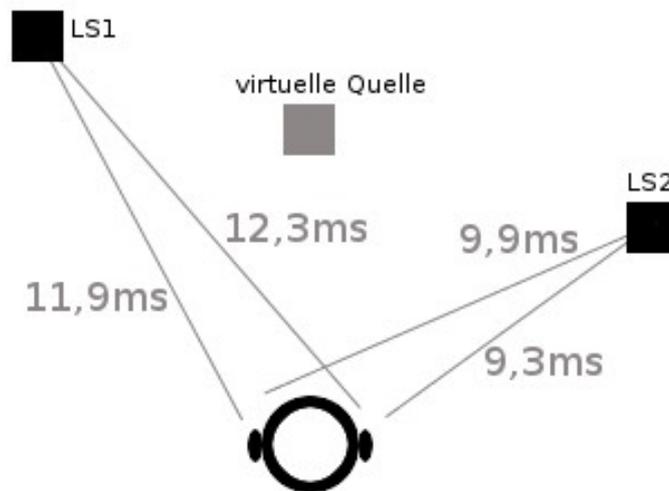


Bild 7: Ohne Laufzeitkorrektur

Zuerst hört man den linken Lautsprecher und dann den rechten, jeweils zuerst am Ohr, das näher am Lautsprecher liegt. Der maximale Zeitunterschied liegt in diesem Beispiel bei 3 ms, ein Wert der durchaus groß genug ist um die räumliche Wahrnehmung zu stören. Das Signal des rechten Lautsprechers im obigen Beispiel erreicht den Zuhörer an beiden Ohren, bevor das Signal des linken Lautsprechers überhaupt am Hörer eintrifft. Die zwei bzw. drei Lautsprecher werden so individuell vom menschlichen Gehör erkannt und nicht, wie beabsichtigt, für eine andere virtuelle Quelle gehalten. Nach der Laufzeitkorrektur sehen die Laufzeiten im Idealfall so aus:

VBAP im IEM Cube

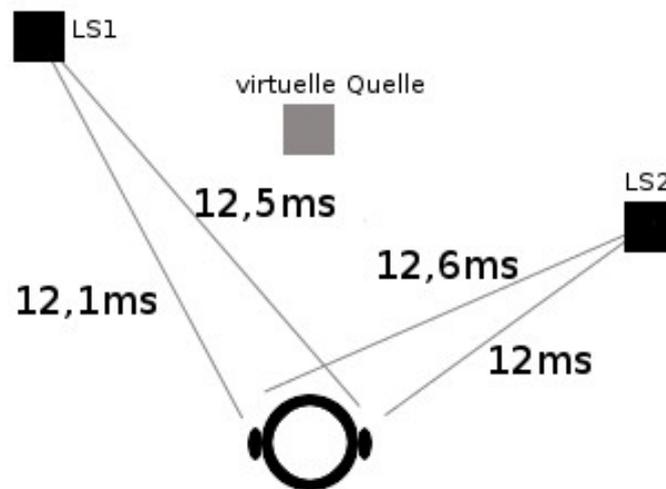


Bild 8: Mit Laufzeitkorrektur

Die Lautsprechersignale erreichen den Zuhörer jetzt wesentlich einheitlicher und die störenden Effekte sind kompensiert. Die interaurale Zeitdifferenz ist unverändert geblieben. Zweifellos wird das Gehör auch davon irritiert, jedoch kann dagegen nichts unternommen werden.

5 Hörversuch

5.1 Durchführung

Sowohl die Implementierung, als auch der Hörversuch wurde durch die Wiederverwendung der Arbeit von [Frank] wesentlich vereinfacht. Der Hörversuch wurde mit drei Versuchspersonen durchgeführt, die jeweils sechs zufällig ausgewählte Winkel drei mal lokalisiert und mit der Zeigepistole anvisiert haben. Die Auswertung der anvisierten Richtung erfolgte automatisch und die Azimut und Elevationswinkel in eine Datei geschrieben. Genauso kann die Position des Zeigegeräts automatisch ausgelesen werden, welche auch für die Berechnungen benötigt wird. Ideal wäre natürlich dazu die Position des Kopfes zu tracken. Diese 54 Messwerte werden nur bezüglich des absoluten Winkelunterschieds ausgewertet, unabhängig von Richtung.

5.2 Auswertung

Der Winkelunterschied zwischen vorgegebenem Winkel und von der Versuchsperson angezeigtem Winkel wird wie folgt berechnet:
Die zwei gegebenen Winkel werden in sphärische Koordinaten mit Radius gleich 1 umgewandelt und als Vektoren angeschrieben. Das Skalarprodukt im euklidischen Raum ist definiert als

$$\vec{x} \cdot \vec{y} = |\vec{x}| \cdot |\vec{y}| \cdot \cos \varphi(x, y)$$

Diese Formel auf den Winkel umgeformt ergibt

$$\varphi(x, y) = \arccos \frac{\vec{x} \cdot \vec{y}}{|\vec{x}| \cdot |\vec{y}|}$$

Der damit resultierende Winkel mit x als Referenz (vorgegebenem Winkel) und y als Messwert (von der Versuchsperson angezeigt) wird grafisch dargeboten und statistisch ausgewertet.

Hier einige Ansichten des mit Matlab[®] nachempfundenen Versuchs.

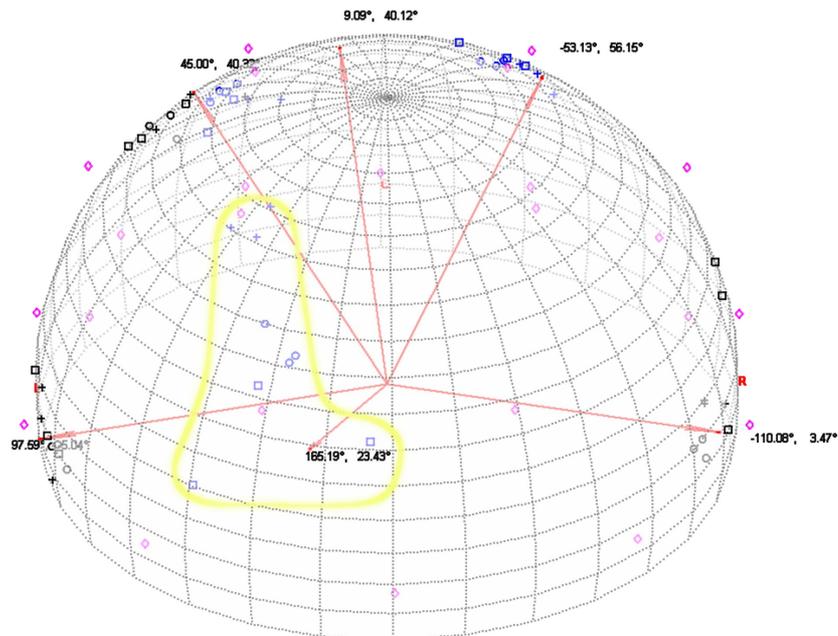


Bild 9: Messwertverteilung Hinteransicht

In Bild 9 sieht man die Messung mit Winkeln 165.19°, 23.43°, welche sich hinter der Versuchsperson befindet. Der rote Pfeil markiert die vorgegebene virtuelle Quelle und die Kreuze, Kreise und Quadrate die Schätzungen der jeweiligen Versuchspersonen. Die Diamanten in Magenta symbolisieren die Lautsprecher. Die Streuung ist groß, was auch die Auswertung mit Boxplot noch bestätigen wird. Besonders Versuchsperson 0 (+) hat sich vom sichtbaren Lautsprecher beeinflussen lassen.

VBAP im IEM Cube

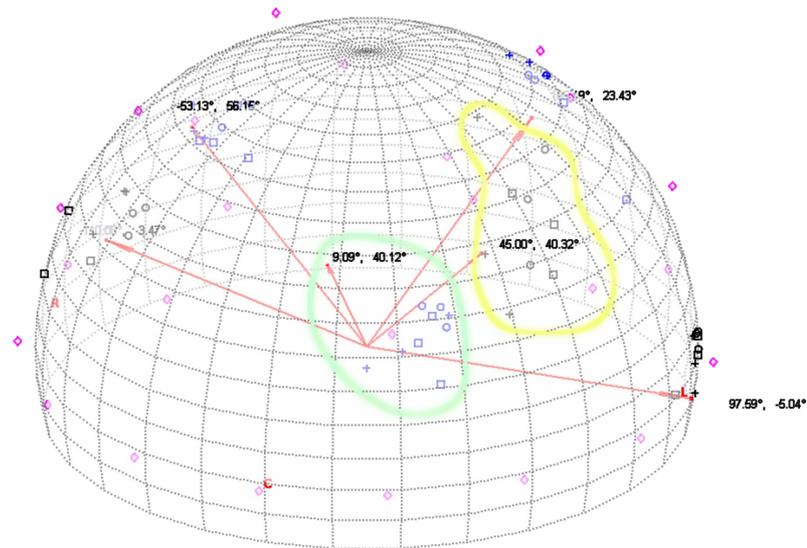


Bild 10: Messwertverteilung Vorderansicht

In Bild 10 sieht man die Vorderseite des ganzen Messaufbaus. Auch beim Messpunkt $9.09^\circ, 40.12^\circ$ in Blau kann man davon ausgehen, dass die Versuchspersonen alle vom Lautsprecher beeinflusst wurden. Eine weitere Bestätigung dafür, dass man die Lautsprecher hinter einem schalldurchlässigen Vorhang verstecken sollte. Der zweite in Gelb eingezeichnete Messpunkt weist ebenfalls einen großen Fehler auf, jedoch ohne merkliche Tendenz.

Auf die anderen Messpunkte soll nicht weiter in dieser grafischen Darstellung eingegangen werden, da sie aufgrund kleiner Fehler wenig Aufschluss geben (siehe Bilder 11 und 12)

Die grafische Auswertung mit der Funktion `boxplot` gibt Aufschluss auf die statistische Verteilung der Fehler.

VBAP im IEM Cube

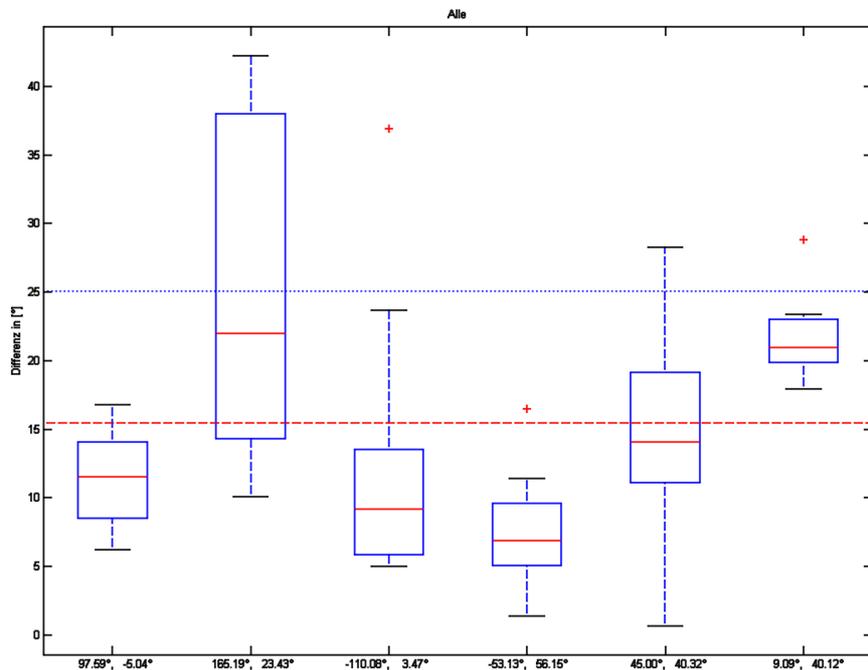


Bild 11: Darstellung mit boxplot

Die Verteilungen der Fehler der verschiedenen Winkelpositionen überschneiden sich nicht augenmerklich. Es kann nicht von gemeinsamen Merkmalen gesprochen werden.

Ein systematischer Fehler liegt in Testrichtungen, die hinter dem Hörer liegen (165.19° , 23.43°). In diesem Bereich funktioniert die Lokalisierung schlecht und die Versuchspersonen tendierten dazu auf den Lautsprecher zu zielen (siehe Bild 9), auch wenn dieser gar nicht sichtbar war. Man kann daraus schließen, dass nicht das Hörereignis der virtuellen Quelle, sondern ein nahe liegenderes, etwa das am einfachsten lokalisierbare vordergründlich erkannt und lokalisiert wird.

Dieser Effekt ist auch bei der Testrichtung 9.09° , 40.12° beobachtet wurde. Obwohl sich die virtuelle Quelle fast frontal liegt wird sie systematisch falsch lokalisiert. Dies liegt einerseits an der relativ hohen Elevation und an dem deutlich beeinflussenden sichtbaren Lautsprecher.

Trotzdem kann die Annahme, dass die einzelnen Versuchspersonen tendenziell die gleichen Fehler gemacht haben nicht bestätigt werden, wie folgendes Diagramm zeigt.

VBAP im IEM Cube

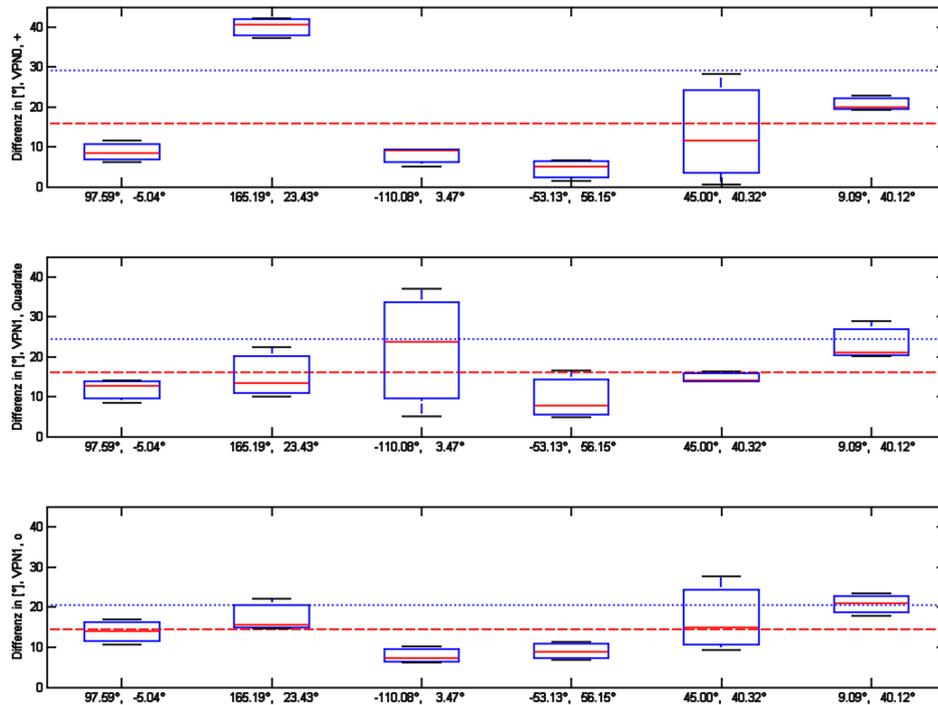


Bild 12: Gegenüberstellung der Versuchspersonen mittels boxplot

Die Verteilungen der Fehler der verschiedenen Versuchspersonen überschneiden sich nicht augenmerklich. Es kann nicht von gemeinsamen Merkmalen gesprochen werden.

6 Fazit

Zu den Nachteilen muss gesagt werden, dass es teilweise Probleme gab, wenn sich die virtuelle Quelle bewegt hat. Wenn von einem aktiven Dreieck auf ein anderes gewechselt wird, kommt es zu leichten Knacksern. Dieses Phänomen tritt in der Theorie nicht auf, war aber wahrscheinlich die Folge von ungenauer Berechnung oder die anfangs fälschlicher Weise verwendete Triangulierung mit mehrdeutig überlappenden Dreiecken.

Die Vorteile des VBAP sind unabhängig von den Testergebnissen:

- Genauigkeit
- Eindeutigkeit
- Einfache Berechnung
- Nur drei Lautsprecher aktiv
- Tolerant gegenüber Hörer und Lautsprecherpositionen

VBAP im IEM Cube

Es wäre jetzt also an der Zeit, das System dem direkten Vergleich mit anderen Verfahren auszusetzen. Aufgrund der unterschiedlichen Quellpositionen des vorliegenden Versuchs zu [Frank], ist der direkte Vergleich anhand der erhobenen Messdaten leider nicht möglich. Man kann aber davon ausgehen, dass es immer von Einsatzart und deren Anforderungen abhängt ob dieses oder ein anderes Verfahren dominiert.

Literatur

- [Blauert] Jens Blauert, „Räumliches Hören“, Hirzel S. Verlag, 1974
- [Pulkki] Ville Pulkki, „Virtual Sound Source positioning Using Vector Base Amplitude Panning“, 1997
- [Frank] Matthias Frank, „Hörversuche zur Lokalisation bei verschiedenen Ambisonics-Dekodern“, 2008
- [Wikipedia] Artikel im Web 2.0 zur Delaunay-Triangulation:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Delaunay-Triangulation>