

# Äquivalenz und Trading

***Gleichsinniges und gegensinniges Auftreten von Laufzeitdifferenzen und Pegeldifferenzen bei der 2-Kanaligen Lautsprecherwiedergabe***

*Potsdam, 03.05.2005*

---

**Vordiplomarbeit Markus Krohn**

HFF „Konrad Wolf“ Potsdam Babelsberg  
Studiengang TON

## **Inhalt:**

	Seite
1. Einführung	3
2. Trennung Kopfhörer – Lautsprecher	4
3. Räumliches Hören	5
3.1. Allgemein	5
3.2. Medianebene	7
3.3. Distanzwahrnehmung	8
4. Stereo – Wiedergabe	9
4.1. Grundlagen	9
4.2. Frequenzgang	11
4.3. Natürliches Hören	11
4.4. Lautsprecher – Wiedergabe	12
4.4.1. Horizontalebene	12
4.4.2. Intensitätsstereofonie	13
4.4.3. Laufzeitstereofonie	15
4.4.4. Einfluss der Hüllkurvenverschiebung	17
4.5. Neuronale Verarbeitung der lateralen Signaldifferenzen	18
5. Zusammenwirken von $\Delta t$ und $\Delta L$	19
5.1. Äquivalenz	19
5.2. Trading	22
5.3. Gegenüberstellung Äquivalenz / Trading	23
6. Praktische Relevanz	24
6.1. Beschallung	24
6.2. Äquivalenzmikrofon	25
7. Glossar	27
8. Quellenverzeichnis	28
9. Abbildungsverzeichnis	28

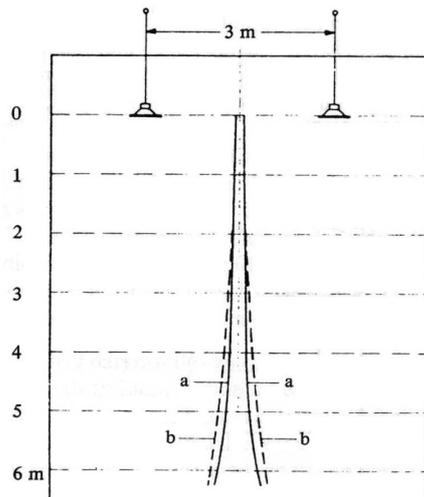
## 1. Einführung

Es gibt in der Fachliteratur zum räumlichen Hören oftmals keine klare Trennung von gleichsinnigem (Äquivalenz) und gegensinnigem (Trading) Auftreten und Zusammenwirken von Pegelunterschieden „ $\Delta L$ “ und Laufzeitunterschieden „ $\Delta t$ “. Häufig ist von *'Äquivalenz, also Trading...'* oder *'Untersuchung zur Äquivalenz durch Tradingversuche...'* und ähnlichem die Rede. Ziel dieser Arbeit soll es sein, die unterschiedlichen Zusammenhänge zwischen bei Lautsprecherstereofonie auftretenden Laufzeit- und Pegeldifferenzen aufzuzeigen.

Welche Relevanz haben die hier folgenden Ausführungen für die praktische Arbeit als Tonmeister? Der überwiegende Teil der in diesem Berufsfeld produzierten Aufnahmen ist für die Wiedergabe auf Lautsprechersystemen gedacht. Die dabei gültigen Gesetzmäßigkeiten für das Entstehen von Phantomschallquellen zwischen den einzelnen Lautsprechern gelten sowohl für die zwei- als auch die mehrkanaligen Wiedergabesysteme, damit also sowohl für Musikproduktionen, welche im Konsumerbereich nach wie vor hauptsächlich in Stereo hergestellt werden, als auch für die gängigen Heim- und Kinotonformate.

Einschränkend ist an dieser Stelle zu sagen, dass die ideale Hörfläche (*vgl. Abb. 1*) für Stereowiedergabe recht klein ist. Im Kinobereich hat theoretisch alles hier genannte ebenfalls Gültigkeit. Jedoch findet aufgrund der großen Basisbreite bei breiten Leinwänden, dem zusätzlichen Mittenlautsprecher und dem Eingreifen von speziellen Prozessoren (CP 65, CP 500, CP 650 u.ä.) in die Lautsprecheransteuerung eine als klassische Stereofonie zu bezeichnende Tonwiedergabe in dem hier beschriebenen Sinne nicht statt.

Es wird deutlich, dass Kenntnisse über o.g. Phänomene praktisch unabdingbar sind, sei es für die Erstellung von Mikrofonierungskonzepten oder für die Endmischung.



**Abb. 1** Stereohörfläche  
Zonen der richtigen Lokalisation bei 3 m Basisbreite:  
a. Begrenzung bei Lautsprechern mit normaler Richtcharakteristik  
b. mit breiter Richtcharakteristik.

*Abb. 1, Stereohörfläche*

Dazu ist es im Interesse der Übersichtlichkeit und Anschauung nötig, die Gültigkeit der folgenden Aussagen auf die 2-kanalige Lautsprecherwiedergabe zu beschränken.

## 2. Trennung Kopfhörer – Lautsprecher

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass das Hören per Kopfhörer einigen völlig anderen Gesetzmäßigkeiten folgt und die hier gemachten Aussagen für diese Art der Wiedergabe nur sehr eingeschränkt gelten. Bei der Wiedergabe per Kopfhörer müssen die sogenannten interauralen Pegel- und Laufzeitdifferenzen nachgebildet werden, welche zusätzlich deutliche Spektraldifferenzen aufweisen. Bei der Wiedergabe über Lautsprechersysteme ist unbedingt darauf zu achten, dass frequenzneutrale Signale entstehen.

Die beim „natürlichen Hören“ an Kopf und Außenohr entstehenden Spektraldifferenzen sind bedingt durch die individuelle Physiologie des Zuhörers, seine Sitzposition und natürlich abhängig vom Schallquellenort. Die so an das Trommelfell gelangenden Schallsignale können große Unterschiede in ihrem Frequenzgang aufweisen.

Zur Anschauung diene dazu *Abb. 2*. Hier sind die frequenzabhängigen Pegeldifferenzen in Abhängigkeit vom Schalleinfallswinkel aufgetragen.

Diese sind beim Hören EINER Schallquelle am Trommelfell mittels Sondenmikrofonen gemessene Werte und haben somit für die Übertragung per Lautsprecher keine praktische Bedeutung.

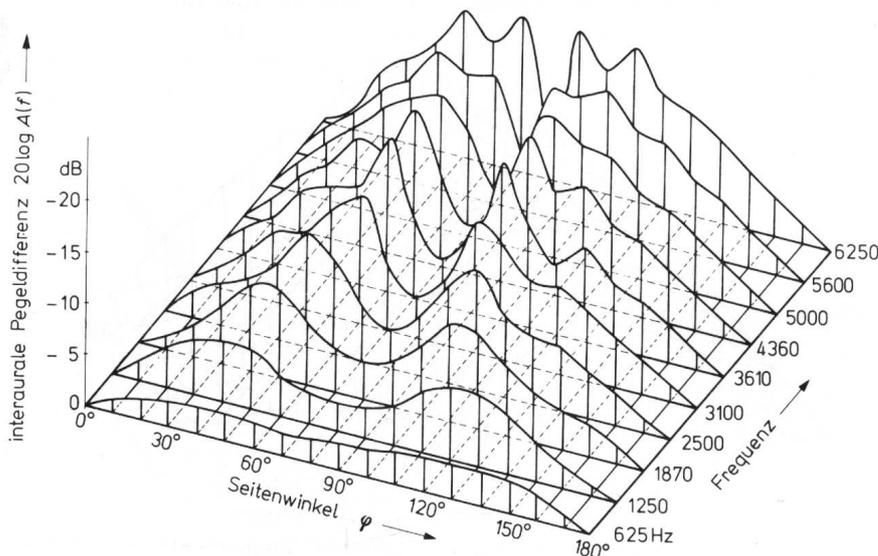


Bild 2. Interaurale Schalldruckpegeldifferenz als Funktion der Schalleinfallrichtung. Berechnet für eine Kugel mit 17,5 cm Durchmesser und Ohrenaufpunkten an den Stellen  $\varphi = 100^\circ$ ,  $\varphi = 260^\circ$  bei  $\delta = 0^\circ$  (Horizontalebene).

Abb.2, interaurale Pegeldifferenz

Würde man einem Zuhörer per Lautsprecher schon „vorgefertigte“ Ohrsignale anbieten, würden diese dann ein weiteres Mal den Einflüssen der Gehörphysiologie unterworfen sein. Das führt zu nicht vorhersehbaren Verfärbungen und ist für die Lautsprecherwiedergabe nicht brauchbar.

### **3. Räumliches Hören**

#### **3.1 Allgemein**

Zu Beginn stehen einige Betrachtungen theoretischer Natur, um die teilweise recht komplexen Vorgänge beim räumlichen Hören systematisch betrachten zu können. Die überaus vielfältige und interdisziplinäre Fülle an involvierten Prozessen bei der auditiven Wahrnehmung lässt es an manchen Stellen nötig erscheinen, auf ausführliche Beschreibungen zugunsten einiger Literaturhinweise zu verzichten.

Es sind hier Vorgänge beteiligt, die für sich genommen die Bereiche der Akustik, der Physiologie und auch der Psychologie berühren.

Wenn von räumlichem Hören die Rede ist, ist im allgemeinen die Fähigkeit gemeint, Schallereignisse aufgrund des aufgenommenen Reizes einem Hörereignisort und einer Distanz zuzuordnen. Dieser Vorgang wird Lokalisation genannt.

Aufgrund der individuell verschiedenen Physiologie aller am Vorgang des Hörens beteiligten Organe sind bei jedem Einzelnen einzigartige Merkmalsausprägungen vorzusetzen. Es lassen sich jedoch mit einer gewissen Toleranz allgemeingültige Aussagen treffen zur Funktionsweise des Richtungshörens.

Es werden in der Literatur (J. Blauert, 1974) drei Ebenen definiert, welche die drei möglichen Raumdimensionen repräsentieren. Diese werden als die Medianebene, die Frontalebene und die Horizontalebene bezeichnet.

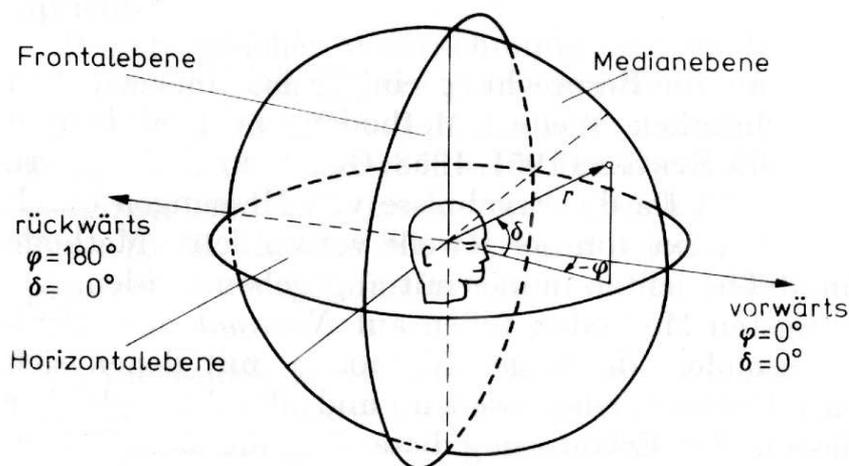


Abb.3 Ebenen nach Blauert

Die Wahrnehmungs- und Zuordnungsvorgänge unterscheiden sich bei diesen Ebenen, deren Anordnung in Abb.3 angedeutet ist, z.T. ganz erheblich. Es spielen dabei verschiedene akustische Phänomene eine Rolle. Voraussetzung ist im allgemeinen, dass unterschiedliche Signale an die beiden Ohren gelangen.

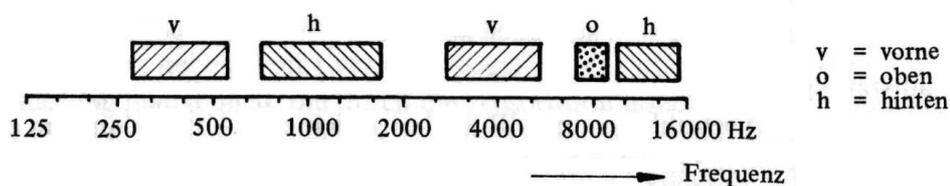
### 3.2 Medianebene

Für das Richtungshören ausschließlich in der Medianebene kommen keine verschiedenen Signale an beiden Ohren zur Geltung, da im Bezug auf diese Ebene die Schallquelle immer den selben Abstand und Winkel zu den beiden Ohren hat. Jedoch gibt es aufgrund der nie absolut symmetrischen Kopfform individualspezifische Abweichungen zwischen den durch die beiden Ohren aufgenommenen Schallsignalen. Hierbei spielen der Frequenzgang und vor allem die individuelle Hörerfahrung eine große Rolle.

Durch Hörversuche zur Lokalisation auf der Medianebene wurde festgestellt, dass der Hörereignisort eines Testsignals bei bestimmten Eigenschaften (z.B. schmalbandige Rauschsignale) lediglich von der Signalfrequenz abhängen kann und nicht vom tatsächlichen Schallquellenort. Hierbei wurde der Schall von Lautsprechern abgestrahlt, die sich an verschiedenen Stellen, jedoch auf dieser Ebene befanden (Blauert, 1968).

Es haben sich einzelne Frequenzbereiche herausgestellt, bei deren Auftreten eine Lokalisation vorzugsweise in bestimmten Richtungen stattfindet.

Diese Frequenzbereiche werden als die sog. „Blauert’schen Bänder“ bezeichnet.



**Abb. 3/9.** Richtungsbestimmende Frequenzbänder bei der Richtungswahrnehmung in der Medianebene (nach [3.19]).

*Abb. 4, Blauert'sche Bänder*

### 3.3 Distanzwahrnehmung

Das Wissen über die Vorgänge beim Zuordnen einer Distanz zu einem bestimmten Schallereignis ist vergleichsweise überschaubar. Es gibt Ausführungen von Coleman (1963) und Laws (1972), die ausführlich darauf eingehen. Das Zustandekommen einer Vorstellung über den tatsächlichen Abstand einer Schallquelle vom Hörer ist ein sehr komplexer Prozess, bei dem viele veränderliche Größen eine Rolle spielen. Auch hier kommt der individuellen Hörerfahrung eine wichtige Bedeutung zu. Es kann jedoch verallgemeinernd gesagt werden, dass entscheidende Informationen in dem Anteil und der Verteilung von auftretenden Reflexionen und deren Verhältnis zum direkten Signal stecken.

Damit ist zu verstehen, dass das Abschätzen (und somit auch das Darstellen) einer Entfernung in geschlossenen Räumen leichter fällt als im sog. freien Schallfeld, welches sich durch das Fehlen jeglicher Reflexionen auszeichnet. Ebenfalls ist die scheinbare Distanz einer Schallquelle stark abhängig vom Frequenzgang des Signals, von der Art des Signals und ebenfalls von seiner Lautstärke.

Eine bedeutende Frage ist zudem, ob dem Zuhörer das Schallsignal vertraut ist (z.B. Sprache), oder ob es sich um unbekannte, vielleicht sogar abstrakte Klänge handelt. Bei dem Zuhörer bekannten Signalen fällt ihm eine ungefähre Feststellung der Distanz wesentlich leichter. Allerdings treten schon hier erhebliche Nichtlinearitäten auf. Als Beispiel kann folgende Grafik für einen dem Zuhörer bekannten Sprecher dienen. Es ist zu erkennen, dass geflüsterte Sprache tendenziell zu nahe und ein Schreien weiter entfernt aufgefasst wird, als es der tatsächlichen Entfernung entspräche.

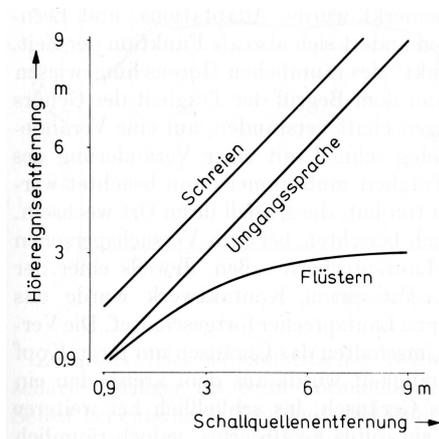


Bild 26. Lokalisation zwischen Sprecher- und Hörereignisentfernung für verschiedene Sprechweisen bei Schalleinfall aus der Vorwärtsrichtung (GARDNER 1969a, 10 Versuchspersonen).

Abb. 5  
Zur Distanzwahrnehmung

Es gibt an dieser Stelle einige Möglichkeiten der Manipulation der Wahrnehmung des Zuhörers, um einen gewünschten Tiefeneindruck entstehen zu lassen. Man kann verschiedene Schallquellen unterschiedlich weit entfernt erscheinen lassen. Dafür stehen verschiedene Hilfsmittel zur Verfügung, wie z.B. Equalizer, Hallgeräte, Pegelsteller, Verzögerungsstrecken u.a.m.

#### 4. Stereo-Wiedergabe

##### 4.1 Grundlagen

Distanzwahrnehmung und Blauert'sche Bänder sollen im Weiteren nicht mehr Gegenstand dieser Arbeit sein. Es wird sich lediglich auf die Richtungswahrnehmung in der Horizontalebene zu beschränken sein, bei der Wiedergabe eines Schallsignals durch zwei Lautsprecher in Stereoanordnung.

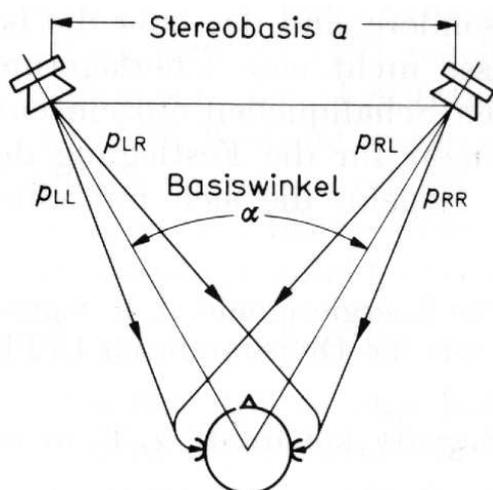


Abb. 6  
Standard Stereowiedergabe-Positionen, Winkel  
{alpha=60}.

Eingezeichnet ist der Weg des Schalls {p} vom Lautsprecher zu jeweils beiden Ohren.

Mit zunehmender Größe der Basisbreite {a} sinkt die Wegstreckendifferenz {Δp}

$\Delta p = p_{LR} - p_{LL} = p_{RL} - p_{RR}$  , (bei mittiger Hörposition) und damit auch die davon abhängende Laufzeitdifferenz {Δt}.  $\Delta t = \Delta p / c$

Bei der Wiedergabe eines Schallereignisses mittels zweier Lautsprecher können grob 2 Fälle unterschieden werden.

- a.) Schallquellenort und Hörereignisort sind identisch, das Signal kommt ausschließlich aus einem LS und wird auch dort lokalisiert
- b.) Schallquellenort und Hörereignisort sind nicht identisch, das Signal wird aus beiden Lautsprechern wiedergegeben und wird irgendwo zwischen den Lautsprechern auf der sogenannten Stereobasis lokalisiert. → Phantomschallquelle

Von Interesse ist sicherlich der zweite Fall, da dieser am häufigsten auftritt und ermöglicht, wesentlich mehr Hörereignisorte zu schaffen als Lautsprecher im Wiedergabesystem vorhanden sind. Für den kreativen Umgang mit Klängen, die Darstellung von Räumlichkeit und Durchsichtigkeit von Audio-Produktionen sind Kenntnisse über die Vorgänge, welche der Entstehung solcher Phantomschallquellen zugrunde liegen, von Bedeutung.

Wovon hängt nun der einem Schallsignal zugeordnete Hörereignisort ab, wenn dieses durch mehrere Schallquellen gleichzeitig abgestrahlt wird?

Es sind im Wesentlichen 3 Parameter zu finden, die sich bei Schallereignissen unterscheiden können, wenn es zur Lokalisation von Phantomschallquellen an verschiedenen Orten kommt. Das sind im Einzelnen:

1. Der Frequenzgang
2. Die Lautstärke
3. Ein zeitlicher Versatz bei der Wiedergabe je Schallquelle

## **4.2. Frequenzgang**

In der Tat spielt die Veränderung des Frequenzganges eine entscheidende Rolle für die räumliche Zuordnung eines Schallereignisses, im Besonderen für die Richtungswahrnehmung „vorn-hinten“ sowie „obern-unten“. Es sei an die o.g. Blauert'schen Frequenzbänder für die Wahrnehmung in der Medianebene erinnert.

Ebenfalls kommt für die Entscheidung, ob eine Schallquelle ortsfest oder bewegt ist, einem sich ändernden Frequenzgang große Bedeutung zu. Über die dabei relevanten, komplexen Frequenzgänge kann bei (Blauert, 1968) im Detail nachgeschlagen werden.

Hier wird diese Abhängigkeit keine weitere Rolle spielen, da für die Wiedergabe mit zwei Lautsprechern in Stereoanordnung die anderen beiden Parameter die größere Bedeutung besitzen und sogar besonders auf eine frequenzneutrale Wiedergabe geachtet werden sollte.

## **4.3 Natürliches Hören**

Man stelle sich eine natürliche Schallquelle vor, welche sich z.B.  $45^\circ$  links vor einer Person befindet. Dann ist ihr das linke Ohr zugewandt, das rechte abgewandt und zusätzlich durch den Kopf verschattet.

Es wird also zu dem (durch Kopf und Ohr frequenzabhängigen) Effekt kommen, dass durch das linke Ohr ein größerer Lautstärkepegel detektiert wird als durch das rechte. Außerdem ist das linke Ohr der Schallquelle näher, wenn auch geringfügig. Dieser geringe Unterschied im Abstand macht sich so bemerkbar, dass das rechte Ohr den eintreffenden Schall um eine bestimmte Zeit später aufnehmen kann als das linke (vgl. Abb. 6). Der entsprechende „Laufzeitunterschied“ kann leicht errechnet werden. Es ist zu erkennen, dass beim „natürlichen Hören“ diese Effekte nicht von einander zu trennen sind.

In der Tonbearbeitung gibt es jedoch durchaus die Möglichkeit, diese getrennt voneinander zu beeinflussen und damit sollten sie auch getrennt voneinander untersucht werden

In Lateralisationsversuchen wurde folgender Zusammenhang zwischen der Laufzeitdifferenz und der Auslenkung eines Hörereignisortes aus der Mitte bestimmt.

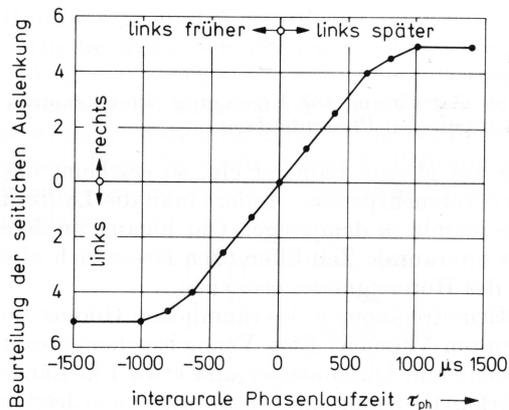


Bild 87. Seitliche Auslenkung des Hörereignisses als Funktion einer verzerrungsfreien interauralen Signalverschiebung. Gültig für Impulse und impulshaltige Signale. 5 Versuchspersonen, Lautstärken von 30 bis 80 Phon (unter Verwendung von Meßwerten von TOOLE und SAYERS, 1965 a).

Abb. 7

Diese Versuche beziehen sich auf Ohrsignale (interaurale Laufzeitdifferenz) und wurden aus diesem Grunde mit Kopfhörern durchgeführt. Für die Lautsprecherwiedergabe sind sie deswegen nicht repräsentativ.

#### 4.4. Lautsprecher-Wiedergabe

##### 4.4.1. Horizontalebene

Im Bereich des Gesichtsfeldes hat der Mensch im Allgemeinen ein horizontales Auflösungsvermögen von bis zu  $1,5^\circ$  (Blauert, 1979b), Das trifft zu im Bereich von  $\pm 45^\circ$  aus der Mittelachse betrachtet und für vertraute Signale wie z.B. Sprache.

Für die Lokalisation eines Schallereignisses in der Horizontalebene, d.h. entlang der Stereobasis (vgl. Abb.6), besteht die Möglichkeit, dass ein Signal bei gleichzeitiger Wiedergabe durch 2 Lautsprechern auf dem einen mit höherem bzw. geringerem Lautstärkepegel wiedergegeben wird als auf dem anderen. Es kann ebenfalls zutreffen, dass ein Lautsprecher das Schallsignal geringfügig eher/später abstrahlt als der andere.

In beiden Fällen hat das eine Auswirkung auf den scheinbaren Schallquellenort, den Hörereignisort, den Ort der Phantomschallquelle. Man spricht an dieser Stelle von „Laufzeitstereofonie“ (geringer zeitlicher Versatz) und „Intensitätsstereofonie“ (verschiedene Wiedergabepegel). Diese beiden Möglichkeiten können unabhängig voneinander und gleichzeitig auftreten.

Im folgenden wird auf die Laufzeitdifferenzen ( $\Delta t$ ) und die Pegeldifferenzen ( $\Delta L$ ) separat eingegangen, um sie danach im Zusammenhang darzustellen. Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, bei der Beschreibung des Hörereignisortes eine Abweichung von der Mittenposition anzugeben. Die Mitte ist leicht zu markieren und nachzuvollziehen. Die in den *Abbildungen 8 /9* gemachten Angaben sind empirisch ermittelt und gelten mit diesen Zahlenwerten für das beschriebene Wiedergabeverfahren für sogenannte 'Interchannelsignale', also für Signale, die Unterschiede bereits bei der Abstrahlung - (hier an den 2 benutzten Lautsprechern) - aufweisen und zwar frequenzneutrale Pegel- und/oder Laufzeitdifferenzen. Diese sollten nicht verwechselt werden mit „Interauralen Signalen“, welche im Ohr (z.B. mittels Sondenmikrofonen) gemessen werden können die und neben den Pegel- und Intensitätsunterschieden ebenfalls spektrale Differenzen aufweisen.

#### *4.4.2. Intensitätsstereofonie*

Als Intensitätsstereofonie bezeichnet man das Verfahren, bei dem ein Signal über zwei Lautsprecher wiedergegeben wird, und ausschließlich frequenzneutrale Unterschiede in der Lautstärke zwischen den beiden Lautsprechern verwendet werden, um Töne an verschiedenen Orten zu platzieren. Hierzu wird üblicherweise das Panorama-Potentiometer verwendet oder ein entsprechendes Stereomikrofon für die Aufnahme genutzt (*Koinzidenzverfahren, siehe M. Dickreiter, Mikrofontechnik*).

Dabei kommt es zur Erzeugung einer Phantomschallquelle zwischen den Lautsprechern, deren genauer Ort allein von der Größe des Pegelunterschiedes abhängt. In dem Sonderfall in dem der Pegel in beiden Lautsprechern genau gleich ist, kommt es zu einer Lokalisation in der Mitte der Stereobasis  $\{a\}$  (*vgl. Abb.6*). Vorausgesetzt ist eine Hörposition im idealen Bereich der oben gezeigten Stereohörfläche.

Ist der Pegelunterschied ungleich Null, kommt es zu einer Auslenkung des Hörereignisortes aus der Mitte, bis hin zu dem Fall, dass der Unterschied so groß ist, dass eine Lokalisation direkt in dem Lautsprecher erfolgt, der das Signal lauter abstrahlt. Die dafür notwendige Pegeldifferenz beträgt 18 dB. Eine Pegeldifferenz von bereits einem dB hat schon eine Auslenkung von ca. 10% aus der Mitte zur Folge.

Dieser Zusammenhang ist nicht linear und in gewissen Grenzen auch signalabgänglich. Tiefe, sinusähnliche Töne werden weniger stark ausgelenkt als hohe, impulshafte Signale. Dieses gilt für Personen mit intaktem Gehör und für Auslenkungen nach links sowie nach rechts gleichermaßen. Ebenfalls tritt hier noch eine leichte Frequenzabhängigkeit auf, auf die hier im folgenden nicht weiter einzugehen ist. Der Effekt ist über das gesamte Audiospektrum hinweg wirksam.

Abbildung 8 macht den beschriebenen Zusammenhang im gesamten Bereich von 0% bis 100% Auslenkung aus der Mitte deutlich. Eingezeichnet sind von verschiedenen Autoren ermittelte Kurven.

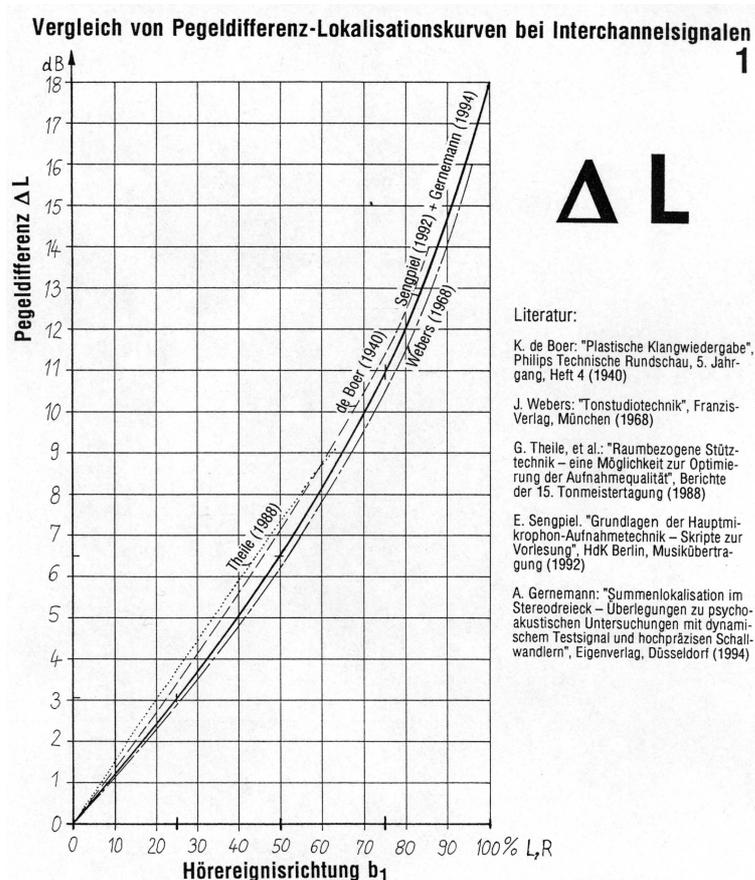


Abb.8

Kurven zur Abhängigkeit des Hörereignisortes von der Pegeldifferenz (E. Sengpiel.)

#### 4.4.3. Laufzeitstereofonie

Bei diesem Verfahren wird die Darstellung eines Schallsignals außerhalb der Mitte erreicht, indem man die Wiedergabe desselben in einem Lautsprecher verzögert. Der Hörereignisort verschiebt sich dann zunehmend in die Richtung desjenigen Lautsprechers, der das Signal eher abstrahlt. Dieser Effekt ist in der Literatur bekannt als „Haas-Effekt“, „Precedence-Effekt“ oder auch „Gesetz der ersten Wellenfront“.

Es ist eine Eigenheit des auditiven Wahrnehmungsvermögens, derjenigen Schallquelle die Herkunft eines Signals zuzuordnen, aus deren Richtung es den Zuhörer zuerst erreicht. Dies gilt sogar dann, wenn das zeitlich nacheilende Signal deutlich lauter ist als das zuerst Eintreffende. Somit ist man z.B. in der Lage, eine potentielle Gefahrenquelle auch auditiv lokalisieren zu können, ohne von u.U. ebenfalls auftretenden Reflexionen über deren Position verwirrt zu werden.

Reflexionen treffen immer nach dem direkten Schall beim Zuhörer ein, da der Schall ja einen „Umweg“ über mindestens eine Reflexionsfläche nehmen muss, um ihn zu erreichen. Die hierbei nötige zeitliche Differenz für die Lokalisation eines Signals bei 100% (also in einem Lautsprecher) beträgt etwa 1,5 Millisekunden. Eine Differenz von 0,1 ms führt bereits zu einer Auslenkung von ca. 10% aus der Mitte.

Dieser Effekt ist ebenfalls mehr oder weniger stark ausgeprägt in Abhängigkeit von der Art des Signals. Tiefe, sinusähnliche Töne werden weniger beeinflusst (oder bedürfen im Umkehrschluss für ein gleiches Ergebnis einer größeren zeitlichen Differenz) als hohe, impulsive Signale. Er ist beim Menschen wirksam im Frequenzbereich von 16 Hz bis 1600 Hz. Oberhalb dieser Frequenz verliert er schnell an Wirksamkeit. 1600 Hz ist diejenige Frequenz, bei der die Wellenlänge in etwa dem Durchmesser des Kopfes entspricht. Bei kleineren Wellenlängen kann also kein eindeutiges Ergebnis mehr wahrgenommen werden.

Die Realisation dieser Art der Stereofonie ist technisch nicht so einfach umzusetzen wie die „simple“ Intensitätsstereofonie. Einige Hersteller integrieren in ihre Produkte sehr aufwendige Panoramamodule, die diesem hier beschriebenen Mechanismus Rechnung tragen. z.B. bei „Staders Virtual Surround Panning“ (VSP) werden Pegelunterschiede, Laufzeitdifferenzen und sogar auch spektrale Differenzen beachtet.

Eine große Rolle spielt die Betrachtung der Laufzeiten bei der Konstruktion von Mehrkanal – Mikrofonensystemen. Bei diesen kann es bei zu geringen Mikrofonabständen (und damit geringen Laufzeitdifferenzen) zu kammfilterartigen Auslöschungen im aufgenommenen Material kommen. Zu große Abstände führen dagegen zu Problemen bezüglich der räumlichen Abbildung.

Auch hier sind die zahlenmäßigen Zusammenhänge der folgenden Abbildung (Abb.9) zu entnehmen.

Die relativ große Streuung der Ergebnisse bei verschiedenen Autoren kommt dadurch zustande, dass z.T. verschiedene Testsignale verwandt wurden. Die Lokalisierbarkeit bei Laufzeitstereofonie ist stark signalabhängig.

Die Kurven der verschiedenen Autoren in der Tabelle zur Intensitätsstereofonie liegen dichter zusammen. Es tritt dort keine so starke Abhängigkeit vom Testsignal auf.

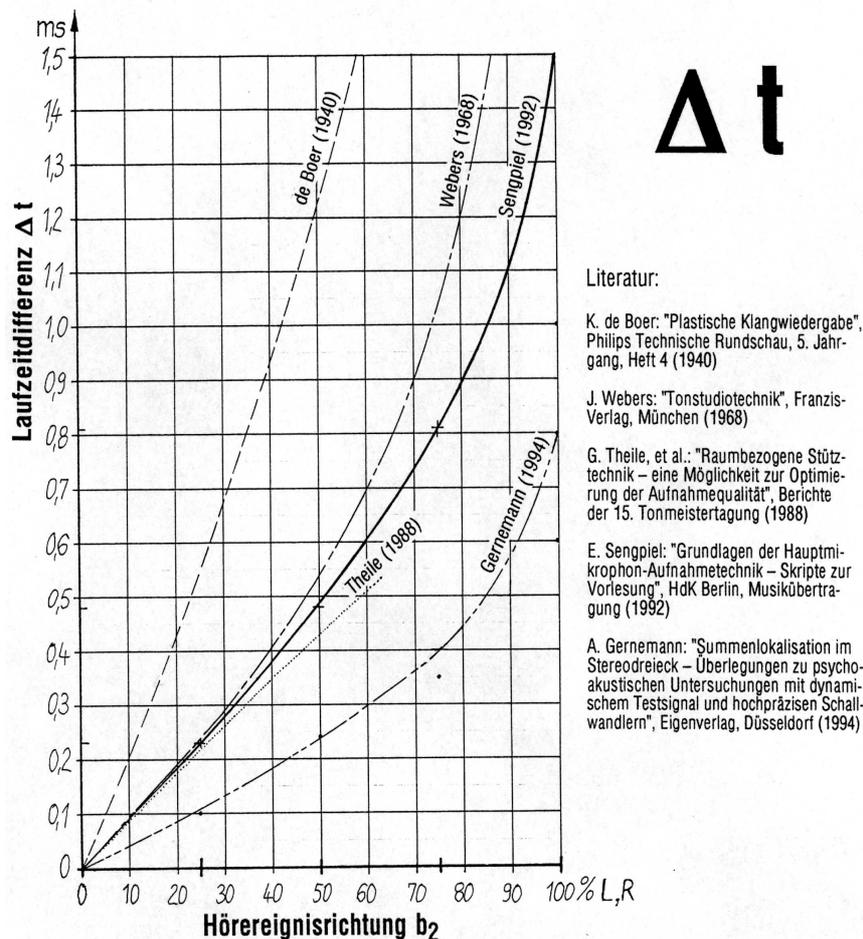


Abb. 9

Kurven zur Abhängigkeit des Höreignisortes von der Laufzeitdifferenz

#### 4.4.4. Einfluss der Hüllkurvenverschiebung

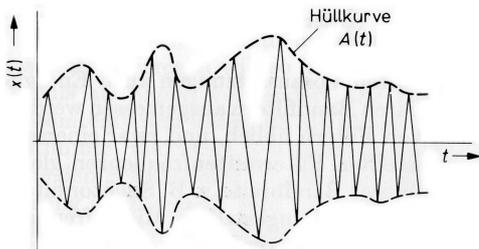


Bild 12. Zur Erläuterung des Begriffs „Hüllkurve“.

Abb. 10

Begriff der Hüllkurve

Ein Tonsignal, welches aus einer Vielzahl von überlagerten Sinusschwingungen besteht, kann im Vergleich zu seiner mittleren Frequenz auch wesentlich tiefere Frequenzanteile enthalten, welche im Schwingungsbild als eine Art einhüllende Schwingung auftreten, ähnlich einer Amplitudenmodulation.

Diese „Hüllkurve“ ist Bestandteil des Signals, kann aber etwa wie eine auf eine höherfrequente „Trägerschwingung“ aufmodulierte Frequenz betrachtet werden.

Erfährt nun bei der Wiedergabe auf 2 Lautsprechern nicht die Trägerschwingung einen kleinen zeitlichen Versatz sondern lediglich die sie einhüllende Schwingung, spricht man von einer zeitlichen Verschiebung der Hüllkurve. Das Gehör ist in der Lage, diese Verschiebung auszuwerten, sogar beim Auftreten von mehreren, sich überlagernden Hüllkurven. Diese zeitliche Verschiebung der Hüllkurve führt ähnlich der Laufzeitdifferenzen zu einer Auslenkung im Stereobild. In diesem Zusammenhang spielt das Trägersignal keine bedeutende Rolle mehr. Es lässt sich im Versuch sogar zeigen, dass völlig korrelierte Träger zu gleichen Ergebnissen führen wie vollständig unkorrelierte Trägersignale (Roederer, 2000).

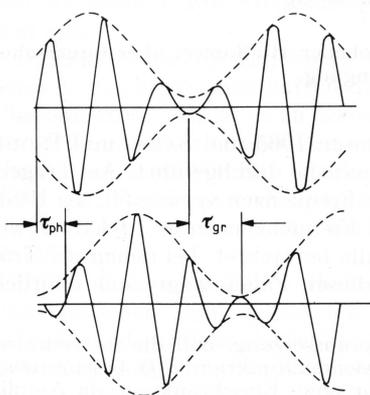


Bild 94. Unterschiedliche interaurale Zeitdifferenz von Trägerschwingung und Hüllkurve.

Abb. 11

Hüllkurvenverschiebung

Zur Anschauung kann hier *Abb.11* dienen. Es ist ein Signal gezeigt, welches sowohl eine Verschiebung der Trägerschwingung erfahren ( $\tau_{ph}$ ) hat, als auch eine Hüllkurvenverschiebung ( $\tau_{gr}$ ).

Der Einfluss der Hüllkurvenverschiebung ist noch nicht vollständig erforscht.

#### 4.5. Neuronale Verarbeitung der lateralen Signaldifferenzen

Die Auswertung der lateralen Signaldifferenzen erfolgt in den höheren Zentren der auditiven Informationsverarbeitung. Dies ist anschaulich erklärt bei der Erläuterung des Phänomens der 'Wahrnehmbarkeit von Schwebungen höherer Ordnung' (J. G. Roederer, 2000). Bei diesem kommt es zur Mustererkennung erst auf der Ebene des neuronalen Vergleiches der verschiedenen Ohrsignale an der sog. oberen mittleren Olive und der sog. Vierhügelregion (vgl. *Abb. 12*, Die Ganglionspirale entspricht dem neuronalen Netzwerk der Schnecke, der ersten Verarbeitungsstufe in der Hörbahn).

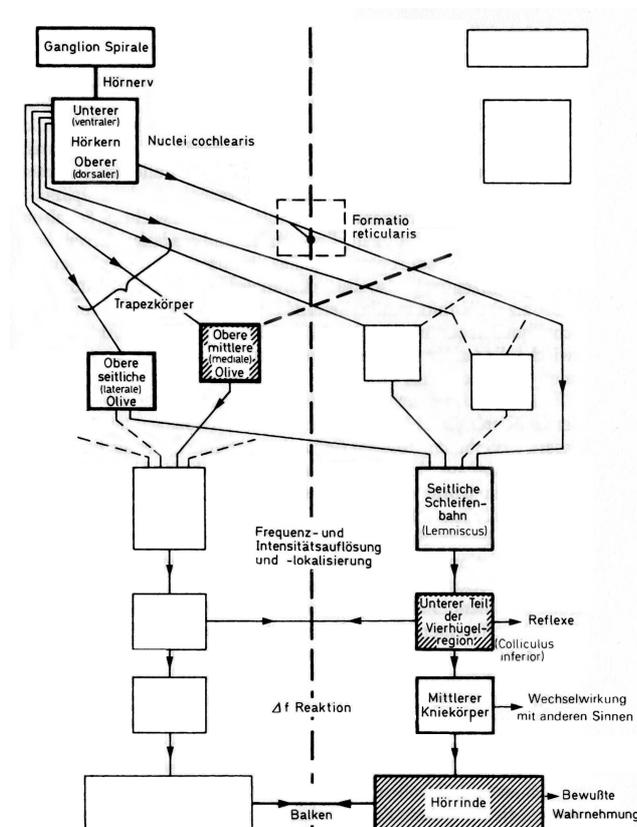


Abb. 2.26. Blockschaltbild der neuronalen Signale in der Hörbahn eines Ohrs durch den Hirnstamm zu den akustischen Hirnrindenarealen

Abb.12  
Hörbahn eines  
Ohres, neuronal

Die benannte Vierhügelregion und die sog. Kniekörper sind Bestandteile des limbischen Systems, welches zum Zentral-Nerven-System gehört.

*(„Das limbische System unterstützt in Zusammenarbeit mit dem autonomen Nervensystem die Aufrechterhaltung des inneren Gleichgewichtes eines Organismus, .... Schließlich reguliert es auch Emotionen und Triebe, die mit Selbsterhaltung und sexuellem Begehren in Zusammenhang stehen.“, Zimbardo, Gerrig, 1999)*

An dieser Stelle treffen Nervenbahnen verschiedener Sinnesorgane, z.B. des auditiven und visuellen Systems, zusammen und auch in Wechselwirkung.

## **5. Zusammenwirken von Laufzeitdifferenz $\Delta t$ und Pegeldifferenz $\Delta L$**

### **5.1. Äquivalenz**

Das gleichzeitige und gleichsinnige Auftreten von  $\Delta t$  und  $\Delta L$  bezeichnet man als Äquivalenz. Was heißt das im Einzelnen?

In dem im Kapitel 4.3. beschriebenen Beispiel mit einem Sprecher, welcher sich  $45^\circ$  links vor dem Hörer befindet, wurde ein Zustand gezeigt, der dem natürlichen Hören entspricht. Es gibt eine „Laufzeitkomponente“ und eine „Intensitätskomponente“, welche jeweils zur Lokalisation des Schallereignisses in Richtung  $45^\circ$  links beitragen. Wenn die beiden beteiligten Vorgänge einzeln betrachtet werden, kann man folgendes erkennen.

Die Laufzeitkomponente allein bewirkt schon eine Lokalisation des Sprechers auf der linken Seite. Wie leicht zu errechnen ist, trifft der Schall etwas eher am linken Ohr ein als am rechten. Auch die Tatsache, dass das linke Ohr hier den Schall mit höherem Pegel aufnimmt, würde allein schon die Quelle auf der linken Seite erscheinen lassen. Es ist somit deutlich, dass  $\Delta t$  und  $\Delta L$  unabhängig voneinander zu einer Lokalisation der Schallquelle auf der linken Seite beitragen. Damit wirken sie gemeinsam und in gleichem (Richtungs-) Sinne. Ihre jeweiligen Wirkungen (Auslenkungen) addieren sich.

Was aber ist denn nun eigentlich „äquivalent“?

Bei der Beantwortung dieser Frage in Bezug auf Lautsprecher-Wiedergabe helfen die beiden Tabellen *Abb. 8 und 9*. Für eine bestimmte Auslenkung des Hörereignisortes aus der Mitte kann jeweils ein bestimmter Wert für eine Laufzeitdifferenz abgelesen werden oder auch ein bestimmter Wert für eine Schallpegeldifferenz. Diese beiden konkreten Werte führen - jeder für sich allein - zu der selben Auslenkung und verhalten sich demzufolge bezüglich ihrer Wirkung auf den Hörereignisort eines Schallsignals äquivalent.

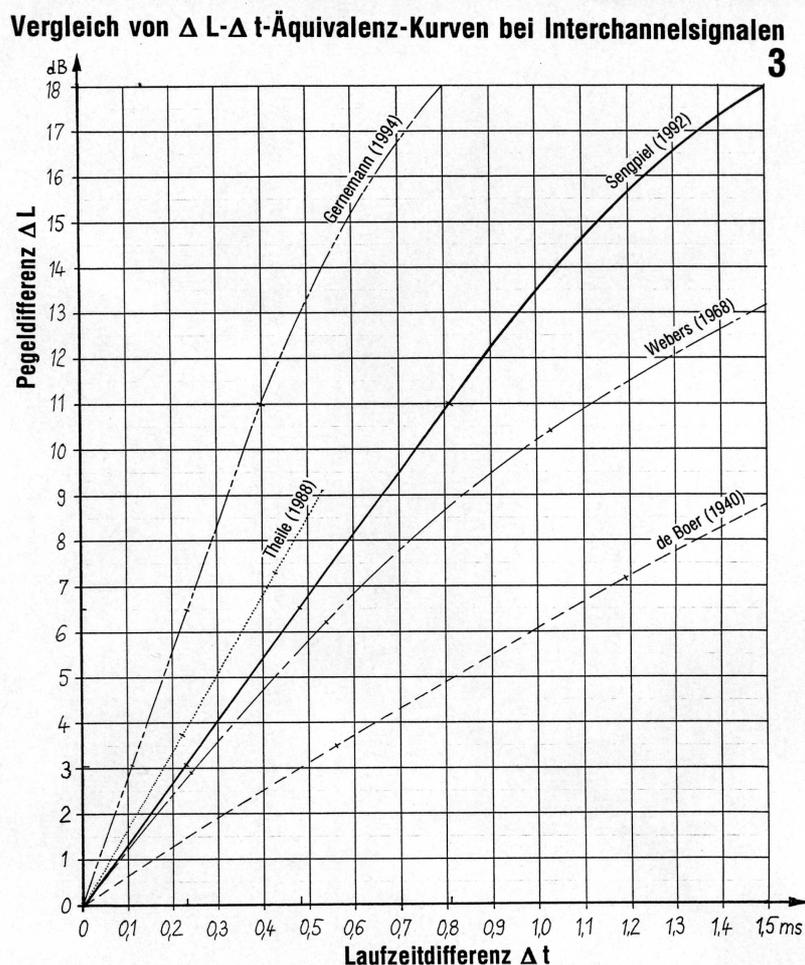


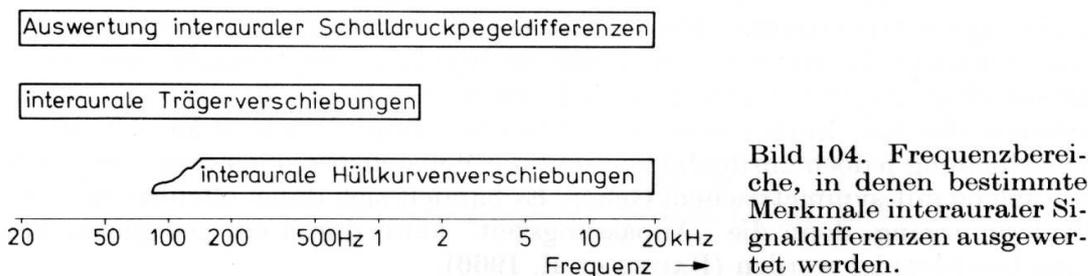
Abb. 13  
Äquivalenzkurven

Diese Grafik enthält von verschiedenen Autoren veröffentlichte Äquivalenz-Kurven. Die hohe Streuung hat ihre Ursache in der bei 4.4.3. bereits erwähnten Streuung bei der Erhebung der Werte für die Laufzeitdifferenzen aufgrund verschiedener Testsignale im Versuch.

Treten nun beide Phänomene gleichzeitig auf, addieren sich ihre Wirkungen. Wenn mittels Laufzeitdifferenz eine Auslenkung von 30% nach links erzielt wird und mittels Schallpegeldifferenz eine Auslenkung von 40% nach links, dann wird das Schallereignis bei 70% links lokalisiert werden. Bei Überschreiten der hundert Prozent an Auslenkung bleibt die Phantomschallquelle direkt bei einem der beiden wiedergebenden Lautsprecher. Eine Auslenkung über die Stereobasis hinaus findet nicht statt. Subjektiv werden durch Intensitätsunterschiede erzielte Hörereignisorte als präziser zu lokalisieren empfunden als solche, die ausschließlich per Laufzeitdifferenz zustande kommen.

Diese wiederum erweisen sich für eine Darstellung von Räumlichkeit als vorteilhaft. Hier existiert ein weiter Versuchsspielraum, der sich z.B. in der Vielzahl der verschiedenen Arten von Stereomikrofonsystemen widerspiegelt.

Ein wichtiger Aspekt ist der, dass die Auswertung von Laufzeitunterschieden ab einer Frequenz von 1600 Hz an Einfluss verliert.



**Bild 104.** Frequenzbereiche, in denen bestimmte Merkmale interauraler Signaldifferenzen ausgewertet werden.

Abb.14

Enthalten Schallsignale überwiegend spektrale Komponenten oberhalb dieser Frequenz, bekommt für deren Lokalisation der Anteil an Schallpegeldifferenz die überwiegende Bedeutung.

Das bedeutet für die praktische Arbeit, dass bei Musikaufnahmen für gespielte Töne, deren Grundfrequenz oberhalb diesen Bereiches liegt, kein Laufzeitanteil wirksam wird.

Hier kann es bei entsprechenden Instrumenten zu im Klangbild „springenden“ Tönen kommen, wenn große Intervalle zu spielen sind und die Grundtöne sich um diesen Bereich bewegen. Diesem Effekt ist dann z.B. durch ein dezentes Zumischen von Stützmikrofonen abzuhelpfen. Deren Signale werden mittels Panoramaregler (Intensitätsstereofonie) am gewünschten Ort ins Stereobild eingefügt und tragen so zu einer Stabilisierung des Klangbildes bei.

## 5.2 Trading

Es gibt im Gegensatz zum oben erläuterten Zusammenwirken der hier betrachteten Größen auch die Situation, dass  $\Delta t$  und  $\Delta L$  nicht wie beschrieben gleichsinnig, sondern, sich kompensierend, mit entgegengesetzten Wirkungen auftreten.

Der lautere Schall trifft dann nach dem leiseren Signal beim Zuhörer ein. Das erzeugt die Situation, dass die Schallpegeldifferenz ( $\Delta L$ ) zu einer Auslenkung des Hörereignisortes in die eine Richtung führt, und gleichzeitig die Auswertung der Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) zu einer Lokalisation der Schallquelle auf der anderen Seite führen müsste. Dieses gegensinnige Auftreten von  $\Delta t$  und  $\Delta L$  nennt man Trading. Die Begriffsbildung ist auf Hörversuche (Blauert, Haas u.a.) zurückzuführen.

In deren Experimenten wurde versucht, einen zahlenmäßigen Zusammenhang für die Äquivalenzbeziehung zwischen  $\Delta t$  und  $\Delta L$  zu finden auf die Weise, dass man ein Schallsignal mittels  $\Delta t$  aus der Mittenposition auslenkte und danach durch eine gegensinnig angewandte Pegeldifferenz  $\Delta L$  wieder in diese Position zurückverschob. Daher der Begriff „Aushandeln“. Das waren letztlich Tradingversuche.

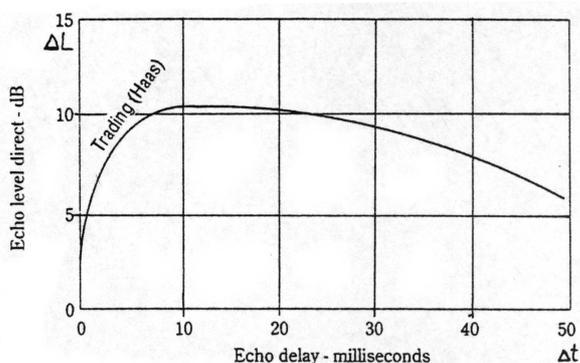


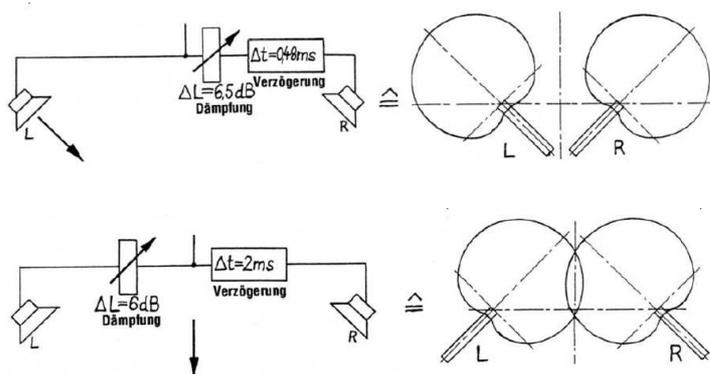
Abb. 15 Haas Kurve (Trading)

Diese Versuche wurden mit Kopfhörern durchgeführt und sind demzufolge für die Lautsprecherwiedergabe nicht relevant. Die entsprechenden Werte für Lautsprecherwiedergabe sind der in *Abb.17* zu findenden Tradingkurve (E. Sengpiel) zu entnehmen.

### 5.3. Gegenüberstellung Äquivalenz / Trading

Phantomschallquellen, die mittels Trading zustande kommen, zeichnen sich durch eine höhere Lokalisationsunschärfe sowie einen veränderten Räumlichkeitseindruck gegenüber solchen aus, die per äquivalentem Einsatz von  $\Delta t$  und  $\Delta L$  entstehen.

Die folgende Abbildung verdeutlicht den Unterschied zwischen Äquivalenz und Trading anhand eines möglichen Versuchsaufbaus und je einer Mikrofonanordnung, mit der man jeweils dem Versuchsaufbau entsprechende Signale aufzeichnen könnte.

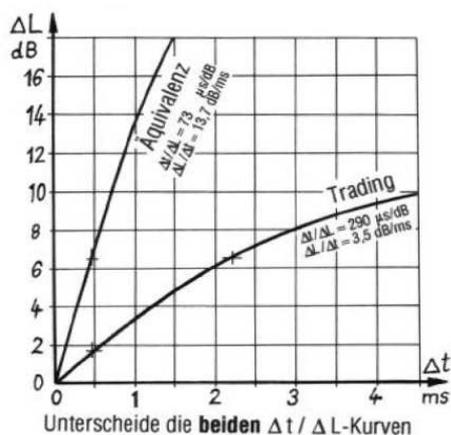


Äquivalenz,  $\Delta t$  und  $\Delta L$   
wirken gleichsinnig

Trading,  $\Delta t$  und  $\Delta L$  wirken  
einander kompensierend

Abb. 16

Zur deutlichen Unterscheidung sind hier in einer Darstellung die beiden, von einander verschiedenen Zusammenhänge eingetragen. Es gibt eine Äquivalenzkurve und eine Tradingkurve.



#### Beispiel:

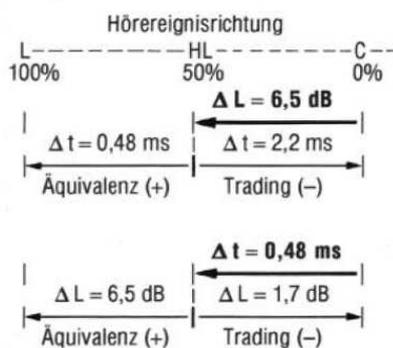


Abb. 17  
Äquivalenz und Trading

## 6. Praktische Relevanz

### 6.1 Beschallung

Eine praktische Bedeutung kommt dem Trading im Bereich der Lautsprecherwiedergabe durch mehrere Systeme zu. Bei der Installation großer Beschallungsanlagen greift man auf diese Technik zurück, um eine Lokalisation an einer gewünschten Stelle (z.B. einer Bühne) zu erhalten. Man nutzt hierbei zusätzlich zur Hauptbeschallung (Primärschall) weitere Lautsprechersysteme (Sekundärschall). Das ist oft nötig, um die aufgrund großer Entfernungen abnehmende Schallenergiedichte <sup>(2)</sup> im Schallfeld kompensieren zu können, bzw. um den in Räumen (durch zunehmenden Einfluss der Reflexionen an Raumbegrenzungsflächen) abnehmenden Direktschallanteil für weiter entfernte Zuhörer wieder zu verstärken.

Hier wird durch den bewussten Einsatz von Trading eine Lokalisation des Schallereignisses in den unterstützenden Lautsprechersystemen vermieden, indem diese zeitlich verzögert werden. Dabei sind zu beachten:

- a) die klassische Haas – Kurve zum Trading. Diese gibt Aufschluss über die zusammenhängenden Größen ( $\Delta t$  und  $\Delta L$ ), welche bei ablesbaren Kombinationen (*Abb.15, 18*) zu einem gleichen Lautstärkeindruck von Primär- und Sekundärschallquelle führen
- b) die Echo Wahrnehmbarkeitsschwelle (*Abb.18*). Dies sind die Kombinationen von  $\Delta t$  und  $\Delta L$ , bei denen die Sekundärschallquelle von mindestens 50% der Zuhörer nicht mehr als eigenständige Schallquelle wahrgenommen werden kann.

<sup>(2)</sup>  $E = J / c$                        $E = \text{Schallenergiedichte,}$                        $c = \text{Schallgeschwindigkeit}$   
 $J = P / S$                        $P = \text{Schallleistung,}$                        $S = \text{durchstrahlte Fläche}$   
 $S = 4 \pi r^2$                        $r = \text{Abstand von der Schallquelle im Kugelschallfeld}$

Die obere Kurve in der folgenden Abbildung gibt Aufschluss über die notwendige Lautstärke und mögliche Verzögerung der Sekundärschallquelle, um die Primärschallquelle vollständig zu verdecken. Diese ist dann nicht mehr wahrzunehmen. Die gestrichelte Linie (gleiche Lautheit...) entspricht der Haas-Kurve (Abb. 15). Die Verzögerungszeit  $S_T$  des Sekundärschalls entspricht der Größe  $\Delta t$ .

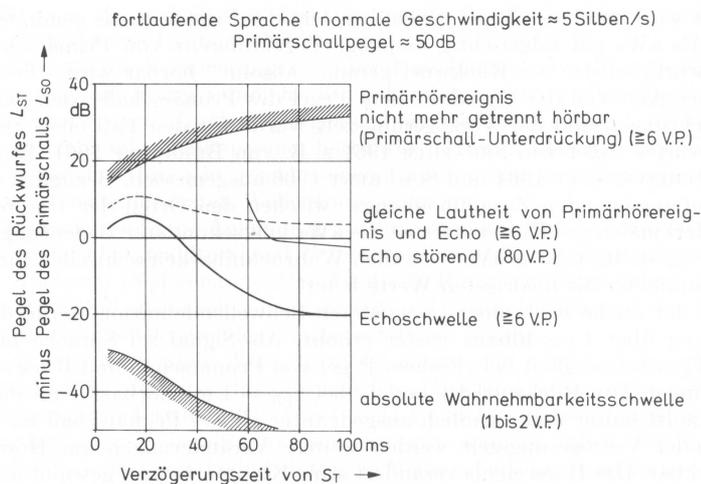


Bild 134. Gegenüberstellung unterschiedlicher Rückwurfswellen (Stereo-Standard-Aufstellung, Basiswinkel  $\alpha = 80^\circ$ ) unter Verwendung von Meßwerten von HAAS 1951, MEYER und SCHODDER 1952, BURGTORF 1961 und SERAPHIM 1961.

Abb. 18  
Echohörschwelle

## 6.2. Das Äquivalenzmikrofon

Eine wichtiger Anwendungsbereich für den Einsatz verschiedener Größen von  $\Delta t$  und  $\Delta L$  ist die Konstruktion von Stereo-Äquivalenzmikrofonen. Bei diesen kommen für die Abbildung z.B. eines ausgedehnten Klangkörpers auf der Stereobasis sowohl Laufzeitdifferenzen als auch Pegeldifferenzen zur Wirkung. Es ist zu vermeiden, diese gegensinnig einzusetzen. Sie werden gleichsinnig eingesetzt, um eine möglichst gute Lokalisierbarkeit bei natürlicher Räumlichkeit auf der Aufnahme zu erzielen. Nach diesem Prinzip arbeitet z.B. das bekannte ORTF- Mikrofon.

Prinzipiell werden solche Mikrofone mit zwei Druckgradientenempfängern realisiert. Diese ermöglichen es aufgrund ihrer Richtwirkung, ein Signal mit einem Pegelunterschied zwischen linkem und rechtem Kanal aufzuzeichnen. Die Wahl eines Abstandes der beiden Mikrofonskapseln von größer Null bedingt gleichzeitig eine Laufzeitdifferenz zwischen den beiden Kanälen.

Durch Variation des Winkels zwischen den Mikrofonen und ihrem Abstand kann nun ein Bereich eingestellt werden, den dieses Mikrofon auf der Stereobasis abbilden kann. Schallquellen die sich innerhalb dieses Bereichs befinden, werden mittels einer gleichsinnig wirkenden Kombination aus  $\Delta t$  und  $\Delta L$  als Phantomschallquelle auf der Stereobasis abgebildet. Alle Schallquellen außerhalb dieses Bereichs erzeugen Kombinationen von  $\Delta t$  und  $\Delta L$ , welche zu einer Lokalisation bei über hundert Prozent Auslenkung aus der Mitte führen müsste. Diese Schallquellen werden am Rand der Stereobasis, in einem der wiedergebenden Lautsprecher lokalisiert werden.

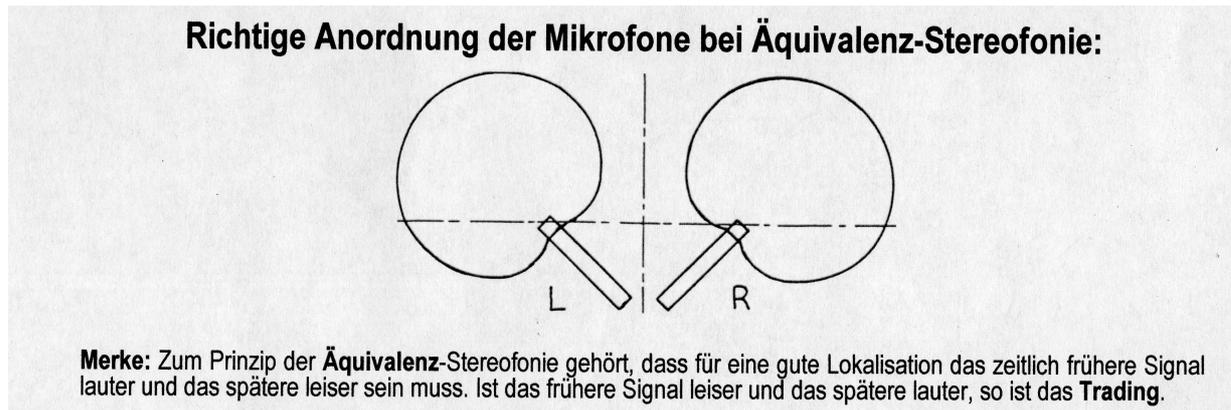


Abb. 19  
Äquivalenzmikrofon

Sehr ausführliche Hinweise zur Konstruktion solcher Mikrofone finden sich bei

[www.sengpielaudio.com](http://www.sengpielaudio.com) unter 'Vorlesungsunterlagen'.

Bei falscher Mikrofonanordnung kann es zu undeutlicher Abbildung der Räumlichkeit kommen oder zu "verschwommenen" Richtungseindrücken. Grund dafür kann sein, dass es Signalanteile gibt, die gegensinnig wirken, also im Sinne von Trading.

## 7. Glossar:

Äquivalenz:	gleichsinniges Wirken von Pegelunterschieden und Laufzeitdifferenzen
Ersatzschallquelle:	gedachte reale Schallquelle am Ort der Phantomschallquelle <sup>(1)</sup>
Hörereignis:	subjektiv wahrgenommenes Schallereignis (Perzept)
Hörereignisort:	dem Schallereignis seitens des Zuhörers subjektiv zugeordneter Ursprungsort
Hörfläche:	Bereich, in dem der Zuhörer dem Einfluss aller an der Wiedergabe beteiligten Schallquellen in relativ gleichem Maße ausgesetzt ist.
Lautsprecher:	im allgemeinen hier identisch mit Schallquelle
Lokalisation:	Vorgang der Zuordnung eines Hörereignisses zu einem Ort
Lokalisationsunschärfe:	Kleinste notwendige Änderung eines bestimmten Merkmals bei der Lokalisation, die zu einer Ortsveränderung des Hörereignisses führt
Ortung:	technischer Vorgang z.B. bei Peilungen, hier nicht gebräuchlich
Phantomschallquelle:	scheinbarer Schallquellenort bei dem Signale mehrerer Schallquellen einem gemeinsamen Hörereignisort zugeordnet werden
Schallereignis:	zu untersuchendes Schallsignal
Schallquelle:	physikalische Quelle der Schallwellen, die einem bestimmten Schallereignis zugeordnet werden
Schallquellenort:	Ort der Schallquelle
Trading:	gegenseitiges, kompensierendes Wirken von Pegelunterschieden und Laufzeitdifferenzen

*(1) Im Model zur Summenlokalisierung (Warncke, 1941) wurde die Phantomschallquelle mit einer gedachten, realen Schallquelle gleichgesetzt und es wurde davon ausgegangen, dass durch Überlagerungen im Schallfeld bei der Wiedergabe mittels zweier Lautsprecher resultierende Ohrsignale entstehen, die den Ohrsignalen gleichen, die bei Wiedergabe über eine Ersatzschallquelle am Ort der Phantomschallquelle entstehen. Gegen dieses Model gibt es in heutiger Zeit gewichtige Einwände, gerade in bezug auf die mangelhafte Erklärbarkeit von spektralen Phänomenen bei der Lautsprecherwiedergabe (Theile, 1984, Tonmeister Informationen). Es kann nur dann noch von Ersatzschallquellen die Rede sein, wenn die zu betrachtende Phantomschallquelle mit der realen Schallquelle identisch ist.*

## **8. Quellenangaben**

- Blauert J. (1974). Räumliches Hören.  
S. Hirzel Verlag, Stuttgart
- Dickreiter M. (1997). Handbuch der Tonstudioteknik.  
K. G. Saur, München
- Roederer J. G. (2000). Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik.  
Springer, Berlin
- Sengpiel E. (2004). [www.sengpielaudio.com](http://www.sengpielaudio.com).
- Zimbardo P. G. (1999). Psychologie.  
Gerrig R. J. Springer, Berlin

## **9. Abbildungsverzeichnis**

- Abb. 1 Dickreiter M. (1997). Handbuch der Tonstudioteknik. S. 126
- Abb. 2 Blauert J. (1974). Räumliches Hören. S. 57
- Abb. 3 Blauert J. (1974). Räumliches Hören. S. 11
- Abb. 4 Dickreiter M. (1997). Handbuch der Tonstudioteknik. S. 121
- Abb. 5 Blauert J. (1974). Räumliches Hören. S. 37
- Abb. 6 Blauert J. (1974). Räumliches Hören. S. 161
- Abb. 7 Blauert J. (1974). Räumliches Hören. S. 116
- Abb. 8 Sengpiel E. (2004). [www.sengpielaudio.com](http://www.sengpielaudio.com).
- Abb. 9 Sengpiel E. (2004). [www.sengpielaudio.com](http://www.sengpielaudio.com).
- Abb.10 Blauert J. (1974). Räumliches Hören. S. 22
- Abb.11 Blauert J. (1974). Räumliches Hören. S. 122
- Abb.12 Roederer J.G. (2000). Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik. S. 79
- Abb.13 Sengpiel E. (2004). [www.sengpielaudio.com](http://www.sengpielaudio.com).
- Abb.14 Blauert J. (1974). Räumliches Hören. S. 132
- Abb.15 Sengpiel E. (2004). [www.sengpielaudio.com](http://www.sengpielaudio.com).
- Abb.16 Sengpiel E. (2004). [www.sengpielaudio.com](http://www.sengpielaudio.com).
- Abb.17 Sengpiel E. (2004). [www.sengpielaudio.com](http://www.sengpielaudio.com).
- Abb.18 Blauert J. (1974). Räumliches Hören. S. 180
- Abb.19 Sengpiel E. (2004). [www.sengpielaudio.com](http://www.sengpielaudio.com).