

Andreas GERNEMANN [UNIVERSITÄT KÖLN]

Mikrofonanordnungen für drei Frontkanäle - eine systematische Betrachtung

The Arrangements of Microphones Using Three Frontal Channels, a Systematic Approach

Der standardisierte 3/2- bzw. 5.1-Mehrkanalton nach ITU-R BS 775-1 (vgl. auch SSF 001-4/98) sieht für die Musikwiedergabe drei Frontlautsprecher vor (Bild 1). Damit ergibt sich das Problem, geeignete Mikrofontechniken für drei Frontkanäle zu finden, da die Anordnungen der Zweikanalstereophonie nicht ohne weiteres übernommen werden können. Insbesondere das Dilemma eines nicht vorhandenen Hauptmikrophons ist offensichtlich.

In diesem Bericht sollen zunächst die Grundlagen für die Erzeugung von Hörereignissen durch die drei Frontlautsprecher erörtert und im Anschluß daran einige bisher realisierte sowie neue Lösungsansätze für entsprechende Mikrofontechniken, auch im Sinne einer universellen Hauptmikrofonanordnung, vorgestellt sowie ihre Möglichkeiten diskutiert werden.

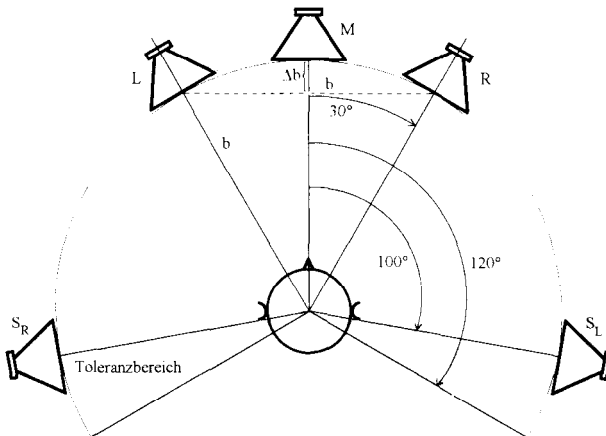


Bild 1: standardisierte Lautsprecheraufstellung für den 3/2 Mehrkanalton

1. Grundlagen

Sollen Hörereignisse durch drei Frontlautsprecher erzeugt werden, so kann man prinzipiell auf die Eigenheiten der Zweikanalstereophonie zurückgreifen. Bei dieser dienen die Lautsprecher entweder als Ersatzschallquelle, oder weit häufiger, zur Erzeugung von sog. Phantomschallquellen zwischen den Schallwandlern mittels des psychoakustischen Phänomens der Summenlokalisierung.

Beim 3/2-Mehrkanalton entsprechend Bild 1 besteht nun aber das Problem, daß im Gegensatz zur Zweikanalstereophonie für die Summenlokalisierung mit drei Frontlautsprechern bislang weitgefächerte Untersuchungen zu den erforderlichen Eigenschaften der Signale der drei Schallwandler, insbesondere Werte für Pegel- (ähnlich „Intensitäts“-Stereophonie) und Laufzeitdifferenzen (ähnlich Laufzeitstereophonie), fehlen

Für Pegeldifferenzen hat neben THEILE [1990a] zunächst GERZON [1992b] Angaben gemacht. GERZON's Werte beziehen sich weniger auf psychoakustische Untersuchungen, sondern stützen sich auf verschiedene Lokalisationstheorien und entsprechende mathematische Formulierungen. Derartige Überlegungen und Berechnungen sind in der Vergangenheit auch schon u.a. für die Stereophonie und Quadrophonie erstellt worden. Unabhängig von der generellen Schwierigkeit, psychoakustische Modelle zur Lokalisation im allgemeinen und insbesondere zur Summenlokalisierung zu erstellen und unabhängig von der Tatsache, daß derartige

Hörereignisort	Pegel linker Kanal	Pegel Mittenskanal	Pegel rechter Kanal
ganz links	0 dB ¹	- ∞	- ∞
75% links	- 1,2 dB	- 6,2 dB	-20,6 dB (Φ) ²
50% links	- 3 dB	- 3 dB	- ∞
25% links	-5,8 dB	- 1,5 dB	- 17 dB
Mitte	-9,6 dB	- 1 dB	-9,6 dB

Tabelle 1: Pegelwerte (Dämpfung) nach GERZON für die Summenlokalisierung mit drei Frontlautsprechern. Für eine Verschiebung der Phantomschallquellen nach rechts gelten die Werte entsprechend

¹ 0dB entspricht hier dem Maximalpegel

² zusätzlich 180° phasengedreht

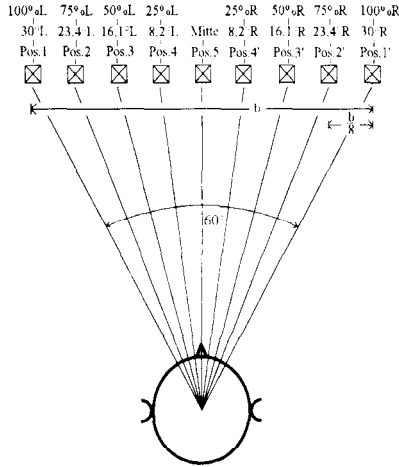


Bild 2 Anordnung der Hörereignisorte (Phantomschallquellen)

Berechnungen, wie auch schon bei der Stereophonie erkannt, häufig nicht mit entsprechenden Ergebnissen von Lokalisations-Untersuchungen übereinstimmen, können die Werte nach GERZON dennoch erste Anhaltspunkte für verwertbare Pegeldifferenzen zur Summenlokalisierung mit drei Frontlautsprechern geben. Praktische Erfahrungen von HASSLER et al. [1993] mit einer Art polymikrophoner Aufnahmetechnik (siehe auch unten) und Abmischung mit Hilfe der GERZON-Werte führten zu durchaus positiven Resultaten. Tabelle 1 gibt einen Überblick für verschiedene Pegelwerte und entsprechende Hörereignisorte (vgl. Bild 2).

Wie aus Tabelle 1 zu entnehmen, wird allerdings bei den GERZON - Werten die konstante Leistungssumme, die für eine gleichmäßige Lautstärke einer Phantomschallquelle unabhängig vom Lokalisationsort erforderlich ist, nur angenähert. Außerdem treten nach den Berechnungen von GERZON gegenphasige Signalanteile zwischen den Kanälen auf, die zwar nur einen sehr geringen Pegel aufweisen, aber dennoch zu den bekannten und in der Literatur mehrfach erwähnten Problemen wie Im-Kopf-Lokalisation von Hörereignissen, unangenehmen „Druckgefühlen“ beim Hörer sowie Lokalisationunscharfen führen können, also zu Eigenschaften, die GERZON mit seinen „optimierten“ Werten eigentlich vermeiden möchte.

Es stellt sich daher die Frage, ob nicht andere Lösungen zu einem besseren Ergebnis führen. Eine Möglichkeit besteht in der *paarweisen Betrachtung* der drei Frontkanäle³.

Sieht man die linke und rechte Hälfte des „Stereo“-Dreiecks getrennt voneinander, können entsprechende Laufzeit- und Pegeldifferenzen zur Erzeugung von Phantomschallquellen für eine Lautsprecheraufstellung in 0° bis 30° links bzw. rechts durch Lokalisationsuntersuchungen bestimmt werden. Der Vorteil liegt vor allem darin, daß wie bei der Stereophonie neben reinen Pegel- auch Laufzeitdifferenzen und Kombinationen von beiden zur Erzeugung von Phantomschallquellen bei drei Frontlautsprechern benutzt werden können.

Eine ungefähre Größenordnung für die zur Lokalisationsverschiebung erforderlichen Werte bei der paarweisen Regelung und einer Abhörposition nach Bild 1 kann man zumindest für Pegeldifferenzen aus einer Untersuchung von THEILE [1990a] herauslesen, auf die hier allerdings nicht weiter eingegangen werden soll.

Um nun genaue Angaben für resultierende Hörereignisorte bei drei Frontlautsprechern mittels unterschiedlicher Pegeldifferenzen und insbesondere auch Laufzeitdifferenzen zwischen zwei benachbarten Frontlautsprechern zu bekommen, wurden am Musikwissenschaftlichen Institut der Universität zu Köln entsprechende Lokalisationstests durchgeführt. Die Aufstellung der Frontlautsprecher entsprach dabei Bild 1 mit einer Lautsprecherbasis (\overline{LR}) von $b = 1,21\text{m}$. Als Testsignale wurden ein „Knack“-Signal (mit einem durch eine Rechteckhalbwelle angenäherten Diracstoß) und ein im reflexionsarmen Raum des Musikwissenschaftlichen Institutes monophon aufgenommenes Violoncello verwendet⁴. Pegel- und Laufzeitdifferenzen der Testsignale wurden mit Hilfe eines Harddiscrecording-Systems eingestellt und orientierten sich an einer Voruntersuchung zur paarweisen Lokalisation. Insgesamt wurden für die

³ GERZON ist dieser paarweisen Betrachtung gegenüber kritisch eingestellt, weil nach seinem Lokalisationsmodell paarweises Abmischen generell zu Lokalisationsunschärfen führt. Da aber die Lokalisationschärfe von vielen Faktoren abhängt und die Resultate mit der Anwendung entsprechender psychoakustisch ermittelter Laufzeit- und Pegeldifferenzen bei der Zweikanalstereophonie sehr positiv sind, ist eine paarweise Betrachtung auch hier durchaus sinnvoll.

⁴ Die Hörversuche fanden im reflexionsarmen Raum statt. Verwendet wurden drei Lautsprecher der gehobenen Mittelklasse (Zweiweg-Kolbenwandler). Der Kopf war bei den Versuchspersonen nicht fixiert. Für weitere Informationen zu Testsignalen und Versuchsbedingungen siehe auch Bericht GERNEMANN, A., RÖSNER, T.: *Die Abhängigkeit der stereophonen Lokalisation von der Qualität der Wiedergabelautsprecher* hier im Tagungsband.

Höreignisort	reine Laufzeitunterschiede	reine Pegelunterschiede
ganz links	links 0,7 ms früher als mitte	links = mitte + 18 dB
75% links	links 0,2 ms früher als mitte	links = mitte + 6 dB
50% links	links = mitte	links = mitte
25% links	mitte 0,45 ms früher als links	links = mitte - 6,5 dB
Mitte	mitte 0,7 ms früher als links	links = mitte - 18 dB

Tabelle 2: Werte für die Summenlokalisierung durch Signale vom mittleren und linken Frontlautsprecher. Für eine Verschiebung der Phantomschallquellen nach rechts gelten die Werte entsprechend.

Angaben in Tabelle 2 die Quartil- und Medianwerte zweier Testreihen mit je 30 Versuchspersonen ausgewertet.

Interessanterweise ähneln die Pegeldifferenzen denen der Stereophonie⁵ sehr, während sich für Laufzeitdifferenzen gänzlich andere Größenordnungen zeigen. Erstaunlich ist auch die auffällige Unsymmetrie besonders bei den Laufzeitdifferenzen. Hier wurden zudem für Werte größer als 0,8 ms von nahezu allen Versuchspersonen deutliche Klangfarbenveränderungen wahrgenommen, die bei der Zweikanalstereophonie in dieser krassen Form nicht auftreten. Bei Verwendung von Laufzeitdifferenzen muß also mit großer Sorgfalt gearbeitet werden.

Ungefähr aus der 50% - Richtung (vgl. Bild 2) ergab sich bei der Testreihe die größte Lokalisationsunschärfe, die aber insgesamt deutlich niedriger als vergleichsweise bei der Zweikanalstereophonie ist, wodurch einerseits der in der Literatur schon häufig angeführte Scharfegewinn durch den mittleren Lautsprecher bestätigt wird, andererseits die paarweise Betrachtung ihre positive Bestätigung findet. Außerdem zeigt sich im Gegensatz zur Stereophonie kein nennenswerter Schärfeunterschied zwischen Laufzeit- und Pegeldifferenzen, erkennbar an dem Mittelwert der Mittelabweichung (Bild 3), der auch gleichzeitig auf die individuellen Lokalisationsunterschiede der Testpersonen hinweist. Letztere haben ebenfalls eine kleinere Streuung als vergleichsweise bei der Zweikanalstereophonie.

Der prinzipielle sinus-/cosinusförmige Dämpfungsverlauf eines Dreikanalpanoramareglers für die paarweise Erzeugung von Pegeldifferenzen eines Primärsignals zwischen den drei Frontkanälen ist in Bild 4 zu sehen. Die Leistungssumme der drei Kanäle ist hier konstant, sodaß die Lautstärke einer Phantomschallquelle unabhängig vom Ort ihres Auftretens ebenfalls konstant bleibt. Viele „Surround“-Panoramaregler („Joystick“), wie sie von verschiedenen

⁵ Lokalisation mit einem Lautsprecherpaar in $\pm 30^\circ$ frontal zum Hörer

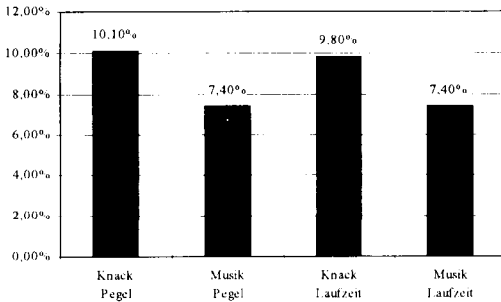


Bild 3: Mittelwert der Mittelabweichung (in Prozent der Lokalisationskala). Untersuchungen zur paarweisen Lokalisation mit drei Frontlautsprechern

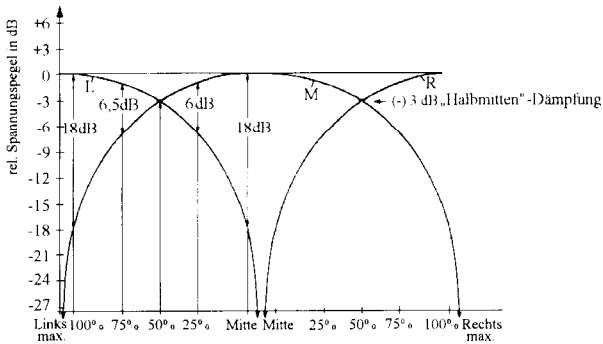


Bild 4: Dämpfungsverlauf des linken, mittleren und rechten Kanals eines Panoramareglers für die paarweise Betrachtung mit resultierenden Hörereignisorten

Mischpultherstellern angeboten werden, arbeiten nach diesem Prinzip.

Neuerdings wird auch auf der Basis verschiedener Untersuchungen zur Verwendung von Kopfübertragungsfunktionen bei der Zweikanalstereophonie versucht, Richtungsmischer, die zum Teil stark vereinfachte, künstliche Kopfübertragungsfunktionen generieren, für den 3/2-Mehrkanalton einzusetzen. Diese Methode ist, wie auch schon bei der herkömmlichen

zweikanaligen Trennkörperstereophonie, in der Literatur stark umstritten, da einerseits derart veränderte Mikrophonsignale immer zu Klangverfärbungen bei der Lautsprecherwiedergabe führen, andererseits psychoakustische Untersuchungen zur generellen Eignung sowie spezifische Lokalisationstests für drei Frontkanäle fehlen. Ein brauchbarer Einsatz solcher „binauraler“ Richtungsmischer ist daher zweifelhaft.

2. Mikrophananordnungen für drei Frontkanäle

2.1 Polymikrophonie

Eine scheinbar plausible Lösung für eine Hauptmikrophon-Anordnung ist in Bild 5 zu sehen. Es zeigt eine Gruppierung ähnlich der Laufzeitstereophonie mit drei Mikrofonen beliebiger Richtcharakteristik, die mit bestimmten Mikrofonbasen a_1 und a_2 zueinander vor einer Schallquelle aufgestellt werden. Das Signal des linken Mikrophons wird für die Wiedergabe ausschließlich auf den linken, das Signal des mittleren Mikrophons ausschließlich auf den mittleren und entsprechend das Signal des rechten Mikrophons ausschließlich auf den rechten Frontlautsprecher geschaltet.

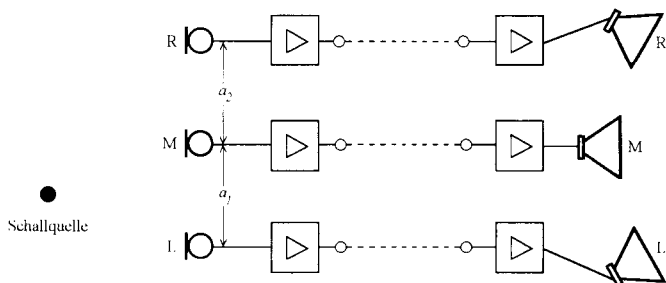


Bild 5: Mikrophananordnung für die Wiedergabe durch drei Frontlautsprecher

Nun ergibt sich aber bei kleinen Mikrofonbasen a_1 und a_2 folgendes Resultat: jedes der drei sich aus der Anordnung ergebende Mikrofonpaare LR, LM und MR erzeugt prinzipiell je eine Phantomschallquelle, deren Orte sich allerdings nicht decken. Es entstehen aber nicht drei getrennte Hörereignisse, sondern nur ein diffus lokalisierbares Hörereignis. Eine solche Mikrofonanordnung mit kleinen Mikrofonbasen a_1 und a_2 ist demnach für den 3/2-Mehrkanalton nicht geeignet. Ebenso verhält es sich, wenn man eine koinzidente Anordnung von drei Richtmikrofonen, ähnlich der „Intensitäts“-Stereophonie benutzt⁶.

Zieht man aber nun die Mikrophone aus Bild 5 weiter auseinander, und werden dabei die Basen a_1 und a_2 so groß, daß die Laufzeit- und Pegelunterschiede zwischen den Mikrofonen nicht mehr zur Summenlokalisierung zwischen den Lautsprechern beitragen, ist die Anordnung bei ausgedehnten Klangkörpern bzw. mehreren Schallquellen als Polymikrophonie des 3/2-Mehrkanaltons anzusehen⁷. Die Lautsprecher fungieren so als Ersatzschallquelle.

Sofern von geeigneten Panoramareglern (Bild 4) kein Gebrauch gemacht wird, beschränkt sich dann allerdings die Lokalisation von Hörereignissen ausschließlich auf 100% links, 100% rechts und Mitte. Dies ist unvermeidbar, möchte man mit dieser Mikrofonanordnung bei der Wiedergabe eines ausgedehnten Klangkörpers die volle Lautsprecherbasisbreite nutzen. Dennoch mag diese Tatsache einen nicht so großen Nachteil bedeuten, wie es zunächst den

⁶ Mit koinzidenten Anordnungen wurde bereits bei der Quadrophonie experimentiert, sowie bei dem von GERZON eingeführten Ambisonic-Verfahren, welches für den 3/2-Mehrkanalton besonders in den USA wiederum in Erwägung gezogen wird („B-Format“: „G·2“). Beim Ambisonic-Verfahren wird mittels einer koinzidenten Anordnung zweier Mikrophone mit achtförmiger Richtcharakteristik und eines Mikrophones mit kugelförmiger Richtcharakteristik („Soundfield“-Mikrophon) sowie einer entsprechenden Matrixierung versucht, Signale für mehrere Wiedergabelautsprecher so zu erzeugen, daß sich die gleichen Hörereignisorte einstellen wie im Originalschallfeld. Ohne an dieser Stelle hierauf näher eingehen zu wollen, läßt sich jedoch durch einfaches Nachrechnen der En- und Dekodierungsvorschriften (GERZON [1983]) zeigen, daß die resultierenden Pegeldifferenzen zwischen den Schallwandlern nicht mit denen aus psychoakustischen Untersuchungen ermittelten Werten übereinstimmen (vgl. auch Kap 1).

Zur Unterscheidung sei hier die von SCHERER eingeführte und unter bestimmten Voraussetzungen gut funktionierende Eidophonie erwähnt, bei der das Raumschallfeld durch ein sich drehendes (elektrisch realisiert) Richtmikrophon abgetastet und über mehrere im Wiedergaberaum verteilte, synchron mit der umlaufenden Richtcharakteristik geschaltete Lautsprecher (meist sechs bis acht, minimal 3) wiedergegeben wird. Das Prinzip der Schallfeldabastung wurde später durch die sogenannte Orthophonie wieder aufgegriffen und erweitert.

Hier muß, wie auch bei ähnlichen Mikrofonanordnungen bei der Stereophonie („Decca“-tree), auf das Verhältnis Abstand Mikrophon/Schallquelle zu Abstand der Mikrophone untereinander bzw. auf den absoluten Abstand der Mikrophone zueinander geachtet werden. Nur wenn die Mikrophone soweit auseinander stehen, daß stets selbst bei leicht seitlich ausgelenkten Schallquellen größere Laufzeit- und aufgrund des Entfernungsunterschieds zusätzliche Pegeldifferenzen auftreten, ist das Prinzip der Polymikrophonie gewährleistet. Nebenbei sei an dieser Stelle bemerkt, daß auch bei der Zweikanalstereophonie mit drei Mikrofonen als „Hauptmikrophon“ zu kleine Mikrofonbasen meistens zu unscharfen Hörereignissen und außerdem zu Klangverfärbungen führen.

Anschein hat. Zum einen ist die Lautsprecherbasis durch vom Mittenlautsprecher hervorgerufene Hörereignisse in der Mitte gefüllt, so daß die extreme Links/Mitte/rechts-Abbildung nicht so negativ auffällt wie eine vergleichbar extreme Links/rechts-Abbildung bei der Stereophonie. Zum anderen existiert zusätzlich je nach Signalbeschaffenheit ein (wenn auch sehr geringer) Lokalisations-Unschärfbereich (Bild 3), der diese extreme Wiedergabe leicht mildert. Da die Lautsprecher als Ersatzschallquelle fungieren und also keine Summenlokalisierung stattfindet, ergibt sich als positiver Nebeneffekt, daß der Lokalisationsort beinahe unabhängig von der Hörposition ist. Viele bisherige Aufnahmen für den 3/2 - Mehrkanalton wurden nach diesem Prinzip erstellt.

Dennoch gibt es Versuche (HERMANN et al [1996]⁸), diese Mikrophonanordnung für die Summenlokalisierung und damit für eine kontinuierliche Erzeugung von Hörereignissen zwischen den drei Frontlautsprechern nutzbar zu machen. Die Autoren gehen nach Ausführungen von BLAUERT zum Gesetz der ersten Wellenfront davon aus, daß die von Signalen eines Mikrophonpaares hervorgerufene Lokalisation durch das dritte Mikrophon nicht mehr beeinflusst wird, wenn die durch den Schalleinfall einer Schallquelle resultierende Laufzeitdifferenz der Signale des Mikrophonpaares kleiner/gleich 1,1ms bleibt und, in Bezug zum nachteilenden Mikrophonsignal des Paares, die Laufzeitdifferenz des Signals des dritten Mikrophons größer als 1,1ms ist, d.h. bei einer mittleren Phantomschallquelle müßte das Signal des Mittenmikrophons exakt um 1,1ms den beiden andern Signalen vorausseilen. Für eine nach links ausgelenkte Phantomschallquelle ergibt sich dann zwischen dem linken und mittleren Mikrophon eine Laufzeitdifferenz kleiner bzw. gleich (100% links) 1,1ms (wobei das Signal des linken Mikrophons dem des mittleren vorausseilt) und zwischen mittlerem und rechtem Mikrophon größer 1,1ms. Für eine nach rechts ausgelenkte Phantomschallquelle gilt dies entsprechend umgekehrt. Eine solche Aufstellung entspräche dann genau dem „Grenzbereich“ zur Polymikrophonie. Allerdings ist hier zu beachten, daß die von BLAUERT angegebene Laufzeitdifferenz für das Gesetz der ersten Wellenfront von mehr als 1ms durch eine Stereophonie-ähnliche Lautsprecheraufstellung mit ausschließlich einem linken und einem rechten Schallwandler $\pm 40^\circ$ zum Hörer ermittelt wurde. Wie Tabelle 2 und die Ausführungen

⁸ Vgl. auch Bericht HERMANN, U., HENKELS, V., BRAUN, D.: *Vergleich von 5 Surround-Mikrophonverfahren* hier im Tagungsband

in Kap. I zeigen, kann dieser Wert nicht ohne weiteres für die Aufstellung mit drei Frontlautsprechern übernommen werden, so daß die Anordnung den neuen Werten angepaßt werden müßte. Gleichzeitig wäre auch noch zu klären, wie die beschriebenen Klangfarbenveränderungen für Laufzeitdifferenzen größer als 0,8ms hier ins Gewicht fallen. Nachteilig bei dieser Mikrophanordnung ist es, daß der Aufnahmebereich stets recht klein ist und für mittlere Hörereignisse ein gewisser Unschärfbereich besteht, so daß die Hörereignisse auch hier entweder stark nach links und rechts fallen oder mittig bleiben bzw. unscharfe Hörereignisse oder Klangverfärbungen auftreten. Durch den eng begrenzten Aufnahmebereich ist zudem eine Tiefenstaffelung nur sehr eingeschränkt möglich. Die Mikrophanordnung muß bei einem größeren Ensemble über demselben aufgestellt werden, was aus klangästhetischen Gründen nicht immer die beste Position darstellt. Dennoch sind erste praktische Erfahrungen mit der Anordnung nach HERMANN et al durchaus positiv, so daß diese Variante mit drei Mikrophanen als Hauptmikrophanordnung für drei Frontlautsprecher in Betracht gezogen werden kann.

Ergänzt man die Anordnung aus Bild 5 um weitere Mikrophone (Bild 6), die wiederum alle den Anforderungen einer Polymikrophonie genügen, können mittels eines geeigneten Panoramareglers (vgl. Bild 4) die zusätzlichen Mikrophanensignale beliebig auf die Kanäle links/Mitte/rechts geschaltet werden, so daß zwischen den Frontlautsprechern Phantomschallquellen entstehen. Eine ähnliche Anordnung wurde bereits in der Praxis selbst für sinfonische Musik (siehe STEINKE [1996], RUMSEY [1998]) erfolgreich erprobt.

Ein Nachteil der besprochenen Polymikrophon-Techniken kann die einseitige stereophone Perspektive (siehe Vortrag des Autors auf der TMT '96) dieser Verfahren sein. Die Betrachtungsweise der stereophonen Perspektive ist prinzipiell auch auf die 3/2 - Mehrkanaltechnik anwendbar. Die Perspektive der einzelnen Mikrophone bei der Polymikrophonie des 3/2 - Mehrkanaltons entspricht derjenigen der Polymikrophonie bei der Stereophonie. Die resultierenden Phantomschallquellen wirken daher prinzipiell recht groß, was je nach Musikrichtung, insbesondere für Aufnahmen im „E“-Musikbereich, nicht immer erwünscht ist. Für die „U“-Musik jedoch ist diese Mikrophanordnung wie das entsprechende Pendant für die Stereophonie sicherlich sehr interessant.

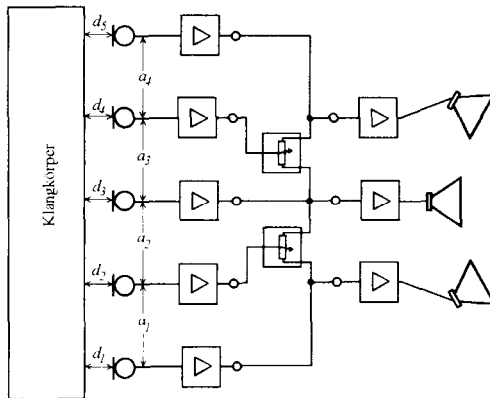


Bild 6 Polymikrophonie - Anordnung für die Wiedergabe durch drei Frontlautsprecher

Für Anwendungen bei der „E“-Musik kann sich jedoch noch ein weiteres Problem mit der Anordnung nach Bild 5 ergeben. Da wie erläutert die Abstände der einzelnen Mikrophone zueinander nicht zu klein werden dürfen bzw. das Verhältnis der Mikrophonabstände zu Abstand Mikrophon-Schallquelle nicht zu klein sein darf, kann hier u. U. nur eine Distanz der Mikrophone zum Klangkörper gewählt werden, die für eine ästhetisch angebrachte Entfernungswahrnehmung zu klein ist. Falls dann die Mikrophone weiter vom Klangkörper wegerrückt werden, sind eventuell die Mikrophone nicht mehr unabhängig voneinander und es kommt bei der Wiedergabe zu unscharf lokalisierbaren Hörereignissen und / oder auf Grund von Interferenzerscheinungen durch „Panning“ zu Klangverfärbungen. Möglicherweise kann hier aber auch ein Kompromiß brauchbare Resultate liefern.

2.2 Stereophone Techniken

Als Alternative zur Polymikrophonie bietet es sich an, auf den Mittenkanal zu verzichten und nur den linken und rechten Frontlautsprecher zu verwenden. Dies entspricht dann einer herkömmlichen stereophonen Anordnung, sodaß die dort bekannten Mikrophontechniken mit

ihren unterschiedlichen Resultaten benutzt werden können. Allerdings verzichtet man mit dem Mittenlautsprecher ebenfalls auf die im Vergleich zur Stereophonie größere Hörzone und bessere Lokalisationsschärfe durch den Mittenlautsprecher. Falls jedoch bei einem Ensemble zusätzlich ein oder mehrere Solisten mitwirken, können vor diesen zusätzliche („Stütz“-) Mikrophone angeordnet werden, deren Signale entweder ausschließlich auf den Mittenkanal oder mittels geeigneter Panoramaregler mit unterschiedlichen Pegeln auf die drei Frontkanäle gemischt werden. Gleiches gilt, wenn man einzelne Instrumente oder Instrumentengruppen durch zusätzliche Mikrophone und entsprechende stereophone Perspektiven hervorhebt. Dieses Verfahren stimmt mit der Haupt- und „Stütz“-Mikrophontechnik der Stereophonie überein, auch mit ihren gestalterischen Möglichkeiten. Gleichzeitig ergibt sich durch den aktiven Einsatz des Mittenlautsprecher wieder der Vorteil der größeren Hörzone zumindest für diejenigen Hörereignisse, die durch die Signale der „Stütz“-Mikrophone hervorgerufen werden⁹. Diese Technik wurde ebenfalls schon für unterschiedliche Musikrichtungen erfolgreich erprobt.

2.3 Das künstliche Mittensignal

Denkbar wäre in diesem Zusammenhang auch, eine zweikanalige, stereophone Aufnahme bei der Wiedergabe durch ein elektrisch erzeugtes Mittensignal zu ergänzen, ähnlich wie es die Decodierungsvorschrift für den Mittenkanal des DOLBY-Stereo/Surround-Verfahrens vorschreibt, und wie es schon in den 50er und 60er Jahren von einigen Autoren mangels ausgereifter stereophoner Techniken vorgeschlagen und angewendet wurde. Dies ist auch für die Frage der Aufwärtskompatibilität von stereophonen Aufnahmen zum 3/2- Mehrkanalton interessant. Erzeugt wird das künstliche Mittensignal M durch eine Addition des gedämpften linken und rechten Signals L und R :

$$M = x \cdot (L + R)$$

⁹ Gilt für die sog. „raumbezogene“ Stütztechnik nach THEILE [1985b] nur eingeschränkt

Hier kann allerdings der Pegelunterschied des linken bzw. rechten Signals zum Mittensignal maximal nur den Wert betragen, der der Dämpfung x des linken bzw. rechten Signals entspricht. Sinnvolle Werte, mit denen der Mittenlautsprecher überhaupt zur Geltung kommt, sind hier 3dB bis 6dB. Dieser maximale Pegelunterschied ist für eine Lokalisation von Phantomschallquellen über die gesamte Lautsprecherbasis b (siehe Bild 1) zu klein (vgl. Tabelle 1 und 2), sodaß die Hörereignisse schnell in die Mitte fallen. Höhere Werte für die Dämpfung des Mittenlautsprechers sind nicht sinnvoll, da dieser dann für die Lokalisation kaum noch zur Geltung kommt¹⁰. Das künstliche Mittensignal führt also zu keinen brauchbaren Ergebnissen, sodaß auch eine Aufwärtskompatibilität von stereophonen Aufnahmen zum 3/2 Mehrkanalton nicht gegeben ist¹¹.

2.4 Eine universelle Hauptmikrofonanordnung für drei Frontkanäle

Es soll an dieser Stelle noch ein weiterer Vorschlag für eine Mikrofontechnik gemacht werden, welche sich wie die Überlegungen zu dem entsprechenden Panoramaregler auf die in Kap 1 angesprochene paarweise Betrachtung der drei Kanäle bezieht.

Geht man davon aus, daß es einen Abstand zwischen verschiedenen Mikrofontgruppen vor einem Klangkörper gibt, bei dem diese Gruppen als unabhängig voneinander gesehen werden können, dann muß man lediglich dafür sorgen, daß Mikrofontaufstellungen mit den erforderlichen Laufzeit- und Pegeldifferenzen laut Tabelle 2 (oder einer Kombination von beiden) für die linke und rechte Seite des Stereodreiecks mit Mittenlautsprecher gefunden werden, die jeweils einerseits entsprechende Phantomschallquellen hervorrufen und sich andererseits gegenseitig nicht beeinflussen (siehe Bild 7). Es werden dann also für ein Hauptmikrofont für drei Frontlautsprecher mindestens vier Mikrofonte für zwei Mikrofontpaare benötigt. Das Signal des rechten Mikrofontes des linken Paares und das des linken Mikrofontes des rechten Paares werden dann auf den mittleren Frontlautsprecher geschaltet, das Signal des linken Mikrofontes des linken Paares allein auf den linken und entsprechend das rechte des rechten Paares allein auf den rechten Lautsprecher (siehe Bild 8).

¹⁰ Unklar sind die Verhältnisse, wenn eine Aufnahme in Laufzeitstereophonie vorliegt

¹¹ Eine konforme Wiedergabe ist durch die Lautsprecheraufstellung (siehe Bild 1) bei ausschließlicher Verwendung von linkem und rechtem Lautsprecher bei stereophonem Material aber möglich.

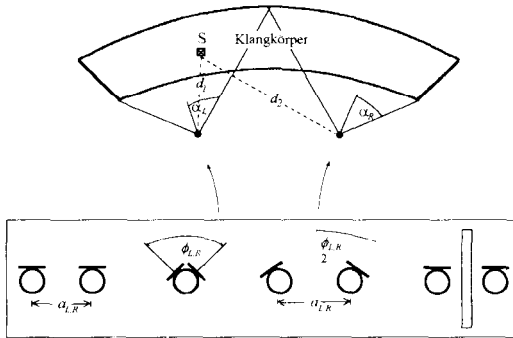


Bild 7: Paarweise Mikrophonaufstellung als Hauptmikrofon für drei Frontkanäle

Um nun festzustellen, unter welchen Bedingungen zwei Mikrophonpaare vor einem Klangkörper weitestgehend voneinander unabhängig sind, wurden am Musikwissenschaftlichen Institut der Universität zu Köln weitere Hörversuche mit 10 geübten Hörern durchgeführt. Diese Versuche mit verschiedenen Testsignalen ergaben, daß weder eine Lokalisationsveränderung (Unschärfe, Hörereignisverschiebung, etc.) noch eine Klangverfärbung von verschiedenen durch Laufzeitdifferenzen oder Pegeldifferenzen (siehe Tabelle 2) hervorgerufenen Phantomschallquellen zwischen einem Links/Mitte- bzw. Rechts/Mitte-Lautsprecherpaar erfolgt, selbst wenn ein kohärentes¹² Signal mit nicht mehr als 7 dB (verglichen mit dem lauterem bzw. früheren Signal des Lautsprecherpaares) von dem jeweils dritten Lautsprecher abgestrahlt wird. Bei vielen Phantomschallquellenorten konnte das Signal des dritten Lautsprechers sogar noch erheblich erhöht werden, ohne daß eine Abweichung wahrgenommen wurde. Da man davon ausgehen kann, daß der Korrelationsgrad zwischen den Signalen des linken und rechten Mikrophonpaares in einer Anordnung nach Bild 7 stets kleiner als eins ist, sei eine Vereinfachung auf 6 dB erlaubt.

Bekanntlich nehmen Schalldruck und Schallschnelle im Fernfeld proportional zum Schallquellenabstand¹³ ab, im Nahfeld die Schallschnelle sogar mit dem Quadrat des Ab-

¹² Def. nach BLAUERT

¹³ Eine Entfernungsverdopplung entspricht dann einer Schalldruck- bzw. Schallschnellepegel-Abnahme von 6 dB

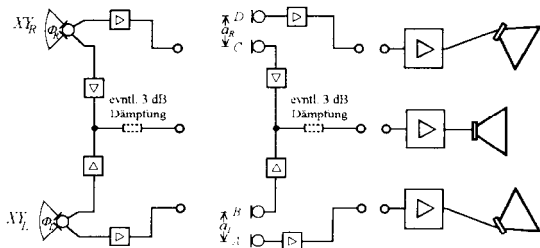


Bild 8. Verschaltung der Mikrofonpaare. Links XY_{L,R}-Anordnung, rechts ABCD-Anordnung

standes. Dann muß eine Schallquelle S , die durch das eine Mikrofonpaar der Anordnung nach Bild 7 als Phantomschallquelle durch Summenlokalisierung mit drei Frontkanalen wiedergegeben werden soll und zu diesem Mikrofonpaar den Abstand d_1 hat, zum anderen Mikrofonpaar mindestens den doppelten Abstand haben, also $d_2 > 2 \cdot d_1$. Im diffusen Schallfeld ist häufig auch bei kleineren Verhältnissen die Unabhängigkeit gegeben, da die Korrelation der Mikrofonsignale dann eher zufälliger Natur ist.

Die beiden Mikrofonpaare können nun den verschiedenen Techniken der Laufzeit-, der „Intensitäts“-, der Äquivalenz- und, wenn unbedingt gewünscht, auch der Trennkörperstereophonie mit ihren spezifischen gestalterischen Eigenschaften entsprechen (vgl. Bild 7), deren Parameter (Mikrofonbasis, Mikrofonversatzwinkel etc.) den Größenordnungen der Laufzeit- und Pegeldifferenzen (vgl. Tabelle 2) für das halbe Stereodreieck mit Mittenlautsprecher angepaßt werden müssen. Damit ergeben sich auch bestimmte Aufnahmebereiche α_L, α_R (siehe Bild 7) der verschiedenen Mikrofontechniken (Tabelle 3). Diese Aufnahmebereiche sollten sich zur Wahrung obiger Abstandsregel und zur Vermeidung von Lokalisationsunscharfen nicht überschneiden. Dabei müssen die Aufnahmebereiche des rechten und linken Mikrofonpaares nicht gleich sein, sondern können unabhängig voneinander der jeweiligen Situation angepaßt werden.

Allerdings treten auch bei dieser paarweisen Mikrofonanordnung Schwierigkeiten auf. So

können, wie auch schon bei der oben beschriebenen Polymikrophonie, je nach Platzangebot, Einsatzort, Größe des Instrumentalistenensembles und aus klangästhetischen Gesichtspunkten nicht immer Aufstellungen gefunden werden, bei denen die Mikrofonpaare tatsächlich unabhängig voneinander sind. Gleichzeitig werden Instrumentalisten, die sich nahe der Mitte des Ensembles und damit außerhalb des Aufnahmebereiches der Mikrofonanordnungen befinden, bei der Wiedergabe ausschließlich in der Mitte der Lautsprecheranordnung lokalisiert, bzw. die Lokalisationschärfe der mittleren Hörereignisse leidet, wenn sich die Aufnahmebereiche der Mikrofonpaare überschneiden. Dennoch sind in der Praxis sinnvolle Kompromisse denkbar.

Zusätzlich kann dabei der Mittenlautsprecher, der ja sowohl mit Signalen des linken und rechten Mikrofonpaares gespeist wird, zu laut erscheinen. Um hier wiederum dem Anspruch der konstanten Lautstärke zu genügen, ist es u.U. erforderlich, ähnlich wie bei den Überlegungen zu den Panoramareglern die Signale des Mittenlautsprechers um 3 dB zu dämpfen. Die dadurch entstehenden zusätzlichen Pegeldifferenzen zwischen dem Mitten- und dem Links- bzw. Rechtssignal führen jedoch zu einer Verschiebung der durch die Mikrofonpaare hervorgerufenen Lokalisation. Sofern ausschließlich mit Pegeldifferenzen gearbeitet wird (ähnlich „Intensitäts“-Stereophonie), kann dies durch eine Verschiebung der Mikrofonpaare jeweils nach außen und / oder eine Anpassung des Aufnahmebereiches ausgeglichen werden. Ersteres käme der Forderung nach Unabhängigkeit der Mikrofonpaare sogar zugute. Beim Arbeiten mit Laufzeitdifferenzen würde jedoch u.U. Trailing entstehen, was zu einer Zunahme der Lokalisationsunschärfe führen kann. Vielleicht ergibt sich aber in der Praxis, daß eine Dämpfung der Signale des Mittenkanals in den meisten Anwendungsfällen nicht erforderlich ist.

Außerdem können durch Schallquellen, die sich nur leicht außerhalb der Ensemblemitte befinden, kleine Laufzeitdifferenzen zwischen den beiden Mikrofonpaaren auftreten, die u.U. bei der Addition für den Mittenkanal zu Kammfiltereffekten und damit zu Klangverfärbungen führen. Da allerdings der Abstand zwischen den beiden Mikrofonpaaren wie erläutert nicht zu klein werden darf, ergibt sich durch die resultierende Pegeldifferenz bereits eine deutliche Milderung dieses Effektes. Auch hier muß die Praxis zeigen, in wieweit mit Nachteilen zu rechnen sind.

Nicht zuletzt bewirken besonders die unsymmetrischen Laufzeitdifferenzen (siehe Tabelle 2),

daß Phantomschallquellenorte mit einer paarweisen Laufzeitanordnung (ABCD) nicht streckenlinear innerhalb der Lautsprecherbasis erzeugt werden können. Dies dürfte aber nur einen kleinen „Schönheitsfehler“ darstellen.

Insgesamt scheint die Alternative der paarweisen Anordnung eine interessante Möglichkeit für ein Hauptmikrofon mit drei Frontkanälen zu sein, sodaß in Zukunft eine weitere Untersuchung und Verfeinerung dieser Technik erfolgen sollte. Erste Anwendungen sind bereits in der Erprobung.

Aufnahmebereich	Mikrofonbasis ¹⁴ für AB bzw. CD	Mikrofonversatzwinkel (Niere) ¹⁵ für XY _{L,R}	Pegelerhältnisse für MS _{L,R} -Anordnung (Kugel) ¹⁶	Pegelerhältnisse für MS _{L,R} -Anordnung (Niere) ¹⁷
$\alpha_{L,R} = 90^\circ$	$a \approx 24 \text{ cm}$	$\phi \approx 100^\circ$	S/M $\approx -3 \text{ dB}$	S/M $\approx -8 \text{ dB}$
$\alpha_{L,R} = 80^\circ$	$a \approx 24,5 \text{ cm}$	$\phi \approx 120^\circ$		S/M $\approx -6 \text{ dB}$
$\alpha_{L,R} = 70^\circ$	$a \approx 25,5 \text{ cm}$	$\phi \approx 140^\circ$		
$\alpha_{L,R} = 60^\circ$	$a \approx 28 \text{ cm}$	$\phi \approx 160^\circ$		S/M $\approx -3 \text{ dB}$
$\alpha_{L,R} = 50^\circ$	$a \approx 31,5 \text{ cm}$	$\phi \approx 180^\circ$	S/M $\approx 0 \text{ dB}$	
$\alpha_{L,R} = 45^\circ$	$a \approx 34 \text{ cm}$			S/M $\approx 0 \text{ dB}$
$\alpha_{L,R} = 40^\circ$	$a \approx 37,5 \text{ cm}$			
$\alpha_{L,R} = 35^\circ$	$a \approx 42 \text{ cm}$			
$\alpha_{L,R} = 30^\circ$	$a \approx 48 \text{ cm}$		S/M $\approx 3 \text{ dB}$	S/M $\approx 2 \text{ dB}$
$\alpha_{L,R} = 25^\circ$	$a \approx 57 \text{ cm}$		S/M $\approx 6 \text{ dB}$	S/M $\approx 5 \text{ dB}$

Tabelle 3: Aufnahmebereiche für verschiedene Mikrofonanordnungen in ABCD und XY_{L,R}. Wie bei der Stereophonie können die beiden XY-Anordnungen auch durch zwei MS-Aufstellung mit einer geeigneten Matrizierung ersetzt werden

3. Fazit

Die Ausführungen haben gezeigt, daß es inzwischen verschiedene Möglichkeiten von Mikrofontechniken für drei Frontkanäle mit unterschiedlichen Eigenschaften gibt. Grundsätzlich kann man zwischen polymikrofonen Anordnungen und zum Teil hier neu vorgestellten Hauptmikrofon-Anordnungen unterscheiden. Während sich die polymikro-

¹⁴ zwei parallel ausgerichtete Mikrophone beliebiger Richtcharakteristik

¹⁵ zwei Mikrophone mit nierenförmiger Richtcharakteristik

¹⁶ bei Verwendung eines Mittelmikrophons mit kugelförmiger Richtcharakteristik

¹⁷ bei Verwendung eines Mittelmikrophons mit nierenförmiger Richtcharakteristik

phonen Techniken bereits vielfach bewährt haben, befinden sich die Hauptmikrophontechniken noch in einem wenn auch vielversprechenden Versuchsstadium. Sollten sich letztere als brauchbar erweisen, entscheidet wie bei der Stereophonie schließlich nur die Gestaltungsästhetik über den Einsatz einer bestimmten Technik oder verschiedener Mischformen. Mittels neuer Untersuchungen, insbesondere was die Größenordnungen von Pegel- und Laufzeitdifferenzen für die Erzeugung von Phantomschallquellen mit drei Frontlautsprechern betrifft, kann einerseits die Polymikrophonie des $3/2$ Mehrkanaltons verfeinert, andererseits die Grundlagen für Hauptmikrophon-Anordnungen geliefert werden, welche sich als ähnlich einfach erweisen wie entsprechende Hauptmikrophontechniken der Zweikanalsterophonie.

Unter Beachtung der vorgestellten Zusammenhänge scheint damit die Lösung des Dreikanal-Hauptmikrophon-Dilemmas in Sicht

Literatur

- BAUER, B.B.: *Phasor Analysis of Some Stereophonic Phenomena*, reprint from the *Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 33, Nr. 11 1961
- BAMFORD, J.S., VANDERKOOY, J.: *Ambisonic Sound for US*, preprint No. 4138 of the 99th convention New York 1995, Audio Engineering Society Inc., New York 1995
- BAUER, B.B., ABBAGNARO, L.A., GRAVEREAUX, D.W., MARSHALL, T.J.: *The Ghent microphone system for SQTM quadrasonic recording and broadcasting*, preprint of the 56th convention Paris 1977, Audio Engineering Society Inc., New York 1977
- BERNFELD, B.: *Simple Equations for Multi-Channel Stereophonic Sound-Location*, preprint No. L-31 of the 50th convention 1975, Audio Engineering Society Inc., New York 1975
- BLAUERT, J.: *Räumliches Hören*, Hirzel Verlag Stuttgart 1974
- BLAUERT, J.: *Räumliches Hören - Nachschrift, neue Ergebnisse und Trends seit 1972*, Hirzel Verlag Stuttgart 1985
- BRAUN, D., HUELDMAYER, C.: *Vier verschiedene Verfahren zur Trennkörperstereophonie*, aus *Bericht 19. Tonmeistertagung 1996*, Verlag K.G. Saur 1997, S. 424 bis 434
- CLARK, H.A.M., DUTTON, P.D., VANDERLYN P.B.: *The 'stereosonic' recording and reproducing system*, reprint from the *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1957, S. 21
- CONSULTATIVE COMMITTEE INTERNATIONAL RADIO: *Doc. CCIR TG 10 I, Temp 1, Rev.1, Draft Recommendation: Multi - Channel Stereophonic Sound System with and without accompanying Picture*, 1991
- COOPER, D.H., SHIGA, T.: *Discrete-Matrix Multichannel Stereo*, aus *Journal of the Audio Engineering Society*, Bd. 20, Nr. 6, 1972, Audio Engineering Society Inc., New York 1972
- EARGLE, J.M.: *Stereophonic Localisation: An Analysis of Listener Reactions to Current Techniques*, reprint *IRE Transactions on Audio*, Bd. 8, September/Okttober 1960
- ELEN, R.G.: *Ambisonic Surround-Sound in the Age of DVD*, aus *AudioMedia* (April) 1998, <http://www.ambisonic.net/ambidvd.html>
- EUROPEAN BROADCAST UNION: *Listening conditions for the assessment of sound programme material. EBU Tech Document 3276 - 1997 (second edition)*, bzw. *EBU Technical Recommendation R22 - 1997*

FUKADA, A., KIYOSHI, T., AKITA, S.: *Microphone Techniques for Ambient Sound on Music Recording*, preprint No. 4540 of the 103rd convention New York 1997, Audio Engineering Society Inc., New York 1997

FELS, P., WÜSTENHAGEN, U. STEINKE, G.: *Optimale Heimwiedergabe von Mehrkanalprogrammen*, aus *Bericht 19. Tonmeistertagung 1996*, Verlag K.G.Saur 1997, S. 170 bis 183

GENUTH, K.: *Ein Modell zur Beschreibung von Außenohrübertragungseigenschaften*, Dissertation an der RWTH Aachen 1984

GERNEMANN, A.: *Die stereophone Perspektive - eine Definition und praktische Anwendung*, aus *Bericht 19. Tonmeistertagung 1996*, Verlag K.G.Saur 1997, S. 392 bis 410

GERNEMANN, A.: *Meßtechnische Untersuchung der akustischen Vorgänge beim natürlichen Hören im Vergleich zu den Vorgängen bei der Laufzeit- und „Intensitäts“-Stereophonie*, Verlag Shaker Aachen 1995

GERNEMANN, A.: *Mehrkanalverfahren für die Musikwiedergabe*, Verlag Shaker Aachen (in Vorbereitung, erscheint 1999)

GERNEMANN, A.: *Zur Diskussion: „Virtual Surround Panning“*, aus *Tonmeisterinformationen 5 6 7 1998*, S.9, Verband Deutscher Tonmeister Berlin

GERNEMANN, A., RÖSNER, T.: *Die Abhängigkeit der stereophonen Lokalisation von der Qualität der Wiedergabelautsprecher*, 20. Tonmeistertagung 1998 (hier im Tagungsband)

GERZON, M.A.: *Ambisomics in multichannel broadcasting and video*, aus *Journal of the Audio Engineering Society*, Bd. 33 Nr. 11, 1983, S. 859 bis 871

GERZON, M.A.: *A Geometric Model for Two-Channel Four-speaker Matrix Stereo System*, aus *Journal of the Audio Engineering Society*, Bd. 23, Nr. 3, 1975, Audio Engineering Society Inc., New York 1975

GERZON, M.A.: *General Metatheory of Auditory Localisation*, preprint 3306 of the 92th convention Vienna 1992, Audio Engineering Society Inc., New York 1992a

GERZON, M.A.: *Panpot Laws for Multispeaker Stereo*, preprint 3309 of the 92th convention Vienna 1992, Audio Engineering Society Inc., New York 1992b

GERZON, M.A.: *The optimum choice of surround sound encoding specification*, preprint of the 56th convention Paris 1977, Audio Engineering Society Inc., New York 1977

GRIESINGER, D.: *Verbesserung der Lautsprecherkompatibilität von Kunstkopfaufnahmen durch herkömmliche und räumliche Entzerrung*, aus *Bericht 15. Tonmeistertagung 1988*, Verlag K.G.Saur 1989, S. 435 bis 452

HASSLER, M., GRONARZ, C., DRILLIKENS, R.: *Das 5-Kanal HDTV-Audioubertragungssystem 3/2 als Tonübertragungssystem für den Rundfunk*, aus *Bericht 17. Tonmeistertagung 1992*, Verlag K.G Saur 1993, S. 338 bis 347

HERMANN, U., HENKELS, V., BRAUN, D.: *Vergleich von 5 Surround-Mikrofonverfahren*, 20. *Tonmeistertagung 1998* (hier im Tagungsband)

HERMANN, U., HENKELS, V., KILBURG, C.: *Produktion eines Posannenquartetts in 3/2 Stereo*, aus *Tonmeisterinformationen 11 12 1996* S. 14 bis 17, Verband Deutscher Tonmeister Berlin

HORBACH, U.: *New Techniques for the Production of Multichannel Sound*, preprint No. 4624 of the 103rd convention New York 1997, Audio Engineering Society Inc., New York 1997

HORBACH, U.: *Virtual Surround Panning*, aus *Tonmeisterinformationen 3 4 1998*, S. 8 bis 10, Verband Deutscher Tonmeister Berlin sowie in *Audio Professional*, Nr. 1, Verlag Keller & Partner GmbH Ulm 1998, S. 10 bis 12

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION: *Recommendation ITU-R BS. 775-1: Multichannel Stereophonic Sound System with and without accompanying Picture*, Genf 1992 bis 1994

JECKLIN, J.: *Musikaufnahmen*, 2. Auflage, Franzis-Verlags GmbH München 1984

JULSTROM, S.: *A High-Performance Surround Sound Process for Home Video*, aus *Journal of the Audio Engineering Society*, Bd. 35 Nr. 7/8, 1987

KEIBS, L.: *Perspektiven für eine raumbezogene Rundfunkübertragung*, aus *Gravesaner Blätter* Nr. 22 1961, S. 2 bis 40

KIRBY, D.G., CUTMORE, N.A.F., FLETCHER, J.A.: *Erzeugung von 5-Kanal Surround Sound Programm*, aus *Tonmeisterinformationen 9 10 1997*, S. 6 bis 11, Verband Deutscher Tonmeister Berlin, sowie als preprint 4430 of the 102nd convention Munich 1997, Audio Engineering Society Inc., New York 1997

KLEPKO, J.: *5-Channel Microphone Array with Binaural Head for Multichannel Reproduction*, preprint No. 4541 of the 103rd convention New York 1997, Audio Engineering Society Inc., New York 1997

KLIPSCH, P.W.: *Circuits for Three-Channel Stereophonic Playback derived from Two Sound Tracks*, reprint *IRE Transactions on Audio*, Bd. 7, November/Dezember 1959, S. 161 bis 165

KLIPSCH, P.W.: *Signal Mutuality in Stereo Systems*, reprint *IRE Transactions on Audio*, Bd. 8, September/Okttober 1960, S. 168 bis 173

KLIPSCH, P.W.: *Stereo Geometry Tests*, reprint *IRE Transactions on Audio*, Bd. 6, November/Dezember 1962, S. 174 bis 176

KLIPSCH, P.W.: *Stereophonic sound with two tracks, three channels by means of a phantom circuit (2PH3)*, reprint from the *Journal of the Audio Engineering Society*, Bd 6, Nr. 2, 1958, S. 118 bis 123

KNOTHE, J.B.: *Richtungsweiser mit gehörrichtigem Verhalten*, Diplomarbeit TU Berlin 1976

KOHNEMANN, R., GENUIT, K.: *Einsatz der Kopfhörertechnik bei der Musikproduktion*, aus *Bericht 13. Tonmeistertagung 1984*, Verlag K.G. Saur 1985, S. 95 bis 102

KUHL, W.: *Über eine Lautsprecheranordnung zur Wiedergabe stereophoner Schall-aufnahmen*, aus *Rundfunktechnische Mitteilungen*, 1959, S. 170 und 171

LAURIDSEN, H., SCHLEGEL, F.: *Stereofone und richtungsdiffuse Klangwiedergabe*, aus *Gravesaner Blätter* Nr. 2 1956, S. 25 bis 27

LEAKEY, D.M.: *Some measurement on the effects of interchannel intensity and time differences in two channel sound systems*, aus *The Journal of the Acoustical Society of America* 31, 1959, S. 977 bis 986

MAKITA, Y.: *On the directional localization of sound in the stereophonic sound field*, aus *European Broadcasting Union Review-Part A*, Nr. 73, S. 102 bis 108, 1962

MATSUDAIRA, T.K., FUKAMI, T.: *Phase Differences and Sound Image Localization*, aus *Journal of the Audio Engineering Society* Bd. 21, Nr. 12, 1973, Audio Engineering Society Inc., New York 1973

MEARES, D.J.: *Perceptual Attributes of Multichannel Sound*, aus *Proceedings of the 12th International Conference 1993*, Audio Engineering Society Inc., New York 1993, S. 171 bis 179

MELLERT, V.: *Die Normung kopfbezogener Stereo-Aufnahmen und deren Wiedergabe über Lautsprecher*, aus *Bericht 10. Tonmeistertagung 1975*, Verband Deutscher Tonmeister 1975, S. 272 bis 277

MERTENS, H.: *Directional hearing in stereophony - theory and experimental verification*, aus *European Broadcasting Union Review-Part A*, Nr. 92, S. 1 bis 14, 1965

MÖLLER, H., HAMMERSHOI, D., HUNDERBOLL, J., JENSEN, C.B.: *Transfer Characteristics of Headphones*, preprint of the 92th convention Vienna 1992, Audio Engineering Society Inc., New York 1992

MOORER, J.A.: *Music Recording in the Age of Multi-Channel*, preprint No. 4623 of the 103rd convention New York 1997, Audio Engineering Society Inc., New York 1997

NISHI, T., INOUE, T.: *Development of a Multi-Beam Array Microphone for Multi-Channel Pickup of Sound Fields*, aus *Acustica*, Bd. 76, Hirzel Verlag Stuttgart 1992, S. 163 bis 172

PLENGE, G.: *Über das Problem der Im-Kopf-Lokalisation*, aus *Acustia* Bd. 26, Hirzel Verlag Stuttgart 1972, S. 241 bis 252

PULKKI, V.: *Virtual sound source positioning using vector based amplitude panning*, aus *Journal of the Audio Engineering Society*. Bd. 45, Nr. 6, 1997, S. 456 bis 465

RUMSEY, F.: *Microphone And Mixing Techniques For Multichannel Surround Sound*, aus *Journal of the Audio Engineering Society*, Bd. 46, Nr. 4 April 1998, S. 354 bis 358

SCHALLER, W., HENSEL, J.: *Orthophonie - Räumliche Aufnahme und Wiedergabe mit orthogonalen Richtcharakteristiken*, aus *Bericht 17. Tonmeistertagung 1992*, Verlag K G Saur München 1993, S. 254 bis 260

SCHIERER, P.: *Eidophonische Wiedergabe mit zwei Abtastebenen*, preprint No. 1313 of the 28th convention Hamburg 1978, Audio Engineering Society Inc., New York 1978

SCHIERER, P.: *Ein neues Verfahren der raumbezogenen Stereophonie mit verbesserter Übertragung der Rauminformation*, aus *Rundfunktechnische Mitteilungen* 1977 Nr 5, S. 196 bis 204.

SENGPIEL, E.: *Blätter zur Vorlesung*, Hochschule der Künste Berlin 1992 bis 1998

SENGPIEL, E.: *Zur Diskussion: Brauchen unsere Lautsprecher eigentlich Ohrsignale?*, aus *Tonmeisterinformationen* 5 6 7 1998, S. 8 bis 9, Verband Deutscher Tonmeister Berlin

SILZLE, A., THEILE, G.: *HDTV-Mehrkanalton: Untersuchungen zur Abbildungsqualität beim Einsatz zusätzlicher Mittenlautsprecher*, aus *Bericht 16. Tonmeistertagung 1990*, Verlag K G Saur München 1991, S. 208 bis 222

SNOW, W.B.: *Basic Principles of Stereophonic Sound*, reprint from the *Journal of the SMPTE* November 1953, Bd. 61, S. 567 bis 589

SOCIETY OF MOTION PICTURE AND TELEVISION ENGINEERS: *Recommended Practice: Loudspeaker Placements for Audio Monitoring in High Definition Electronic Production*, SMPTE N 15.04/152-300B, Dezember 1991

STEICKART, H.W.: *Kopfbezogene Stereophonie - neue Erfahrungen bei Produktion und Rezeption*, aus *Bericht 15. Tonmeistertagung 1988*, Verlag K G Saur 1989, S. 316 bis 331

STEINBERG, J.C., SNOW, W.B.: *Auditory Perspektive - Physical Factors*, reprint from *Electrical Engineering*, Bd. 53, Nr. 1, S. 12 bis 15

STEINKE, G.: *Auf dem rechten Weg zum Mehrkanalton*, aus *Tonmeisterinformationen* 6/7/8 1997, S. 9 bis 15, Verband Deutscher Tonmeister

STEINKE, G.: *Der neue CCIR-Standard: 5-Kanal-Stereophonie*, aus *Audio Professional*, Nr. 2, Verlag Keller & Partner GmbH Ulm 1992, S. 86 bis 95

STEINKE, G.: *Entwicklungstendenzen der Stereophonie*, aus *Bericht 13. Tonmeistertagung 1984*, Verlag K.G.Saur 1985, S. 137 bis 157

STEINKE, G.: *Quo vadis, HDTV-Sound? Gedanken zur Philosophie der neuen CCIR-5-Kanal-Empfehlung*, aus *Bericht 17. Tonmeistertagung 1992*, Verlag K.G.Saur 1993, S. 306 bis 327

STEINKE, G.: *"Surround-Sound". Die neue Phase*, aus *Fernseh- und Kino-Technik*, Nr. 10 und 11, 1996

STEINKE, G.: *Von der Ambiofonie zur Heimbeschallung*, aus *Bericht 16. Tonmeistertagung 1990*, Verlag K.G.Saur München 1991, S. 161 bis 188

STEINKE, G.: *Zur Entwicklung der Quadrophonie*, aus *Bericht 9. Tonmeistertagung 1972*, Verband Deutscher Tonmeister 1972, S. 210 bis 227

STETTER, E.: *Mehrkanaliger Ton bei Film, Video und Fernsehen*, aus *Bericht 17. Tonmeistertagung 1992*, Verlag K.G.Saur 1993, S. 270 bis 282

SURROUND-SOUND-FORUM: *Empfehlungen für die Praxis 2. Entwurf SSF 002-rev.2/97, Wiedergabebedingungen für Mehrkanal-Stereophonie im Studio und im Heim*, Surround-Sound-Forum des Verbandes Deutscher Tonmeister 1997

SURROUND-SOUND-FORUM: *Empfehlung SSF 001-4 98*, Surround-Sound-Forum des Verbandes Deutscher Tonmeister 1998

THEILE, G.: *Die Bedeutung der Diffusfeldentzerrung für die stereofone Aufnahme und Wiedergabe*, aus *Bericht 13. Tonmeistertagung 1984*, Verlag K.G.Saur 1985a, S. 112 bis 124

THEILE, G.: *Das Kugelflächenmikrofon*, aus *Bericht 14. Tonmeistertagung 1986*, Verlag K.G.Saur 1987, S. 277 bis 293

THEILE, G.: *Enlarging of the Listening Area by Increasing the Number of Loudspeakers, preprint of the 88th convention Montreux 1990*, Audio Engineering Society Inc., New York 1990a

THEILE, G.: *Hauptmikrofon und Stützmikrophone - neue Gesichtspunkte für ein bewährtes Aufnahmeverfahren*, aus *Bericht 13. Tonmeistertagung 1984*, Verlag K.G.Saur 1985b, S. 170 bis 185

THEILE, G.: *Möglichkeiten und Grenzen der 3.2-Stereo-Aufnahme*, aus *Bericht 19. Tonmeistertagung 1996*, Verlag K.G.Saur 1997, S. 139 bis 158

THEILE, G.: *On the Performance of Two-Channel Stereophony, preprint of the 88th convention 1990*, Audio Engineering Society Inc., New York 1990b

THEILE, G.: *The New Sound Format „3 2-Stereo“*, aus *Bericht 17. Tonmeistertagung 1992*, Verlag K.G.Saur 1993, S. 294 bis 305

THEILE, G.: *Trends and Activities in the Development of Multichannel Sound Systems*, aus *Proceedings of the 12th International Conference 1993*, Audio Engineering Society Inc., New York 1993, S. 180 bis 187

THEILE, G.: *Wie natürlich kann das stereophone Klangbild in Zukunft sein?*, aus *Bericht 15. Tonmeistertagung 1988*, Verlag K G Saur 1989, S. 78 bis 105

THEILE, G.: *Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereophonen Signalen bei Lautsprecherwiedergabe: Die Klangfarbe*, aus *Rundfunktechnische Mitteilungen*, Nr. 4 1981, S. 146 bis 154

THEILE, G.: *Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereophonen Signalen bei Lautsprecherwiedergabe: Die Richtungsabbildung*, aus *Rundfunktechnische Mitteilungen*, Nr. 4 1981, S. 67 bis 72

THEILE, G.: *Zur Theorie der optimalen Wiedergabe von stereophonen Signalen über Lautsprecher und Kopfhörer*, aus *Rundfunktechnische Mitteilungen*, Nr. 4 1981, S. 155 bis 170

URBACH, H.: *Die DVD als Tonträger - Musikwiedergabe im High-End Surround-Sound*, DVD Seminar an der Robert-Schumann-Hochschule 1997, eigene Aufzeichnungen

VERMEULEN, R.: *Musik und Elektroakustik*, aus *Gravesamer Blätter* Nr. 15 1960, S. 2 bis 7

VORLÄNDER, M.: *Freifeld- und Diffusfeld-Übertragungsmaße von natürlichen Köpfen und von Kunstköpfen*, aus *Acustia* Bd. 74, Hirzel Verlag Stuttgart 1991, S. 192 bis 200

WEBERS, J.: *Die tonliche Nachbearbeitung von Filmen für das Fernsehen oder das Filmtheater*, aus *Bericht 8. Tonmeistertagung 1969*, Pressestelle des Westdeutschen Rundfunks 1969, S. 102 bis 111

WÖHR, M., NELLESSEN, B.: *Untersuchungen zu Wahl des Hauptmikrofonverfahrens*, aus *Bericht 14. Tonmeistertagung 1986*, Verlag K G Saur 1987, S. 106 bis 120

WOSZCZYK, W.R.: *Quality Assessment of Multichannel Sound Recordings*, aus *Proceedings of the 12th International Conference 1993*, Audio Engineering Society Inc., New York 1993, S. 197 bis 218

ZIEGELMEIER, W., THEILE G.: *Darstellung seitlicher Schallquellen bei Anwendung des 3/2 Stereo-Formates*, aus *Bericht 19. Tonmeistertagung 1996*, Verlag K.G.Saur 1997, S. 159 bis 169