

Wellenfeldsynthese

Neue Möglichkeiten der räumlichen Tonaufnahme und -wiedergabe — Teil II

Fortsetzung von FKT X/2003, S. XYZ

4. Synthese von WFS und Stereophonie

Offenbar ist die konsequente Anwendung des Wellenfeldsynthese-Konzepts, die getrennte Übertragung von „Gestalt“ und „Raum“, in vielen Fällen wenig sinnvoll. **Bild 14** zeigt die wesentlichen Elemente der WFS-Übertragung^{*)}. Mit Blick darauf sind in der folgenden **Tabelle I** die prinzipiellen Probleme zusammengefasst.

*) Die Messung der Raumimpulsantworten ist mit dem optimalen ringförmigen Mikrofonarray dargestellt (in der Praxis wird ein einziges Mikrofon schrittweise im Kreis bewegt).

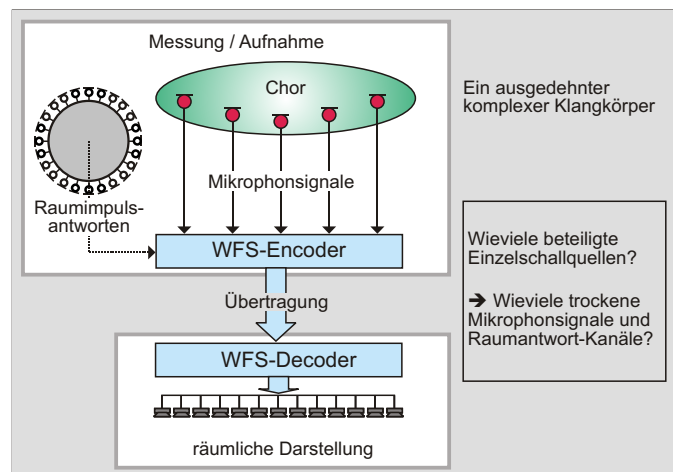


Bild 14 (links). Elemente der WFS-Übertragung

Bild 15 (rechts). Stereophone Aufnahme als Reduktionsprozess der Übertragungskanäle

stereophonen räumlichen Darstellung, sie ist von der Zahl der zu übertragenden Schallquellen völlig unabhängig. **Bild 15** macht am Beispiel der Choraufnahme deutlich, dass im Lichte der WFS-Technik die stereophone Aufnahme- und Wiedergabetechnik auch als eine Art Datenreduktionsprozess aufgefasst werden kann. Aus beispielsweise 50 Einzelschallquellen eines Chors werden mit fünf Mikrofonen drei Übertragungskanäle gemischt und über drei Wiedergabekanäle reproduziert. Das Gehör nimmt den Chor wieder mit 50 verteilten Sängern wahr.

4.1.2. Künstlerische Gestaltung des Klangbilds

Ein besonders gravierender Vorteil der stereophonen Aufnahmemethoden ist der klangliche Aspekt eines Stereomikrophons. Kein Tonmeister würde auf die Idee kommen, eine Orchesterproduktion für das 2/0- oder 3/2-Stereoformat nur mit

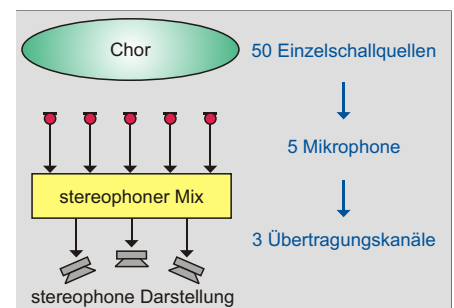


Tabelle I. Prinzipielle Nachteile des WFS-Tonübertragungsverfahrens

Nachteil der WFS	Beschreibung / Begründung
Bedarf an hoher Übertragungskapazität	mit steigender Anzahl an Einzelschallquellen nimmt die Anzahl der benötigten Übertragungskanäle nahezu proportional zu
Bedarf an hoher Rechenkapazität	erforderliche wiedergabeseitige Rechenleistung wächst überproportional mit der Anzahl der Übertragungskanäle
punktförmige Darstellung ausgedehnter Klangkörper	die virtuelle Schallquelle entsteht aus einem einzigen monophonen Nahfeld-Mikrophonsignal
keine befriedigende Möglichkeit der Atm-Übertragung	Konzepte der Aufteilung in Aufnahmesektoren führen zu keinen befriedigenden Ergebnissen. Konflikt mit den gemessenen Raumimpulsantworten
unbefriedigende Klangfarbe wegen der „trockenen“ (sehr nahen) Stützmikrophone	keine ausreichende Möglichkeit der direkten, mikrofonseitigen Einflussnahme auf die Klangfarbe
keine Abwärtskompatibilität	Die Verwandtschaft zu den bestehenden stereophonen Aufnahmetechniken ist nicht gegeben.

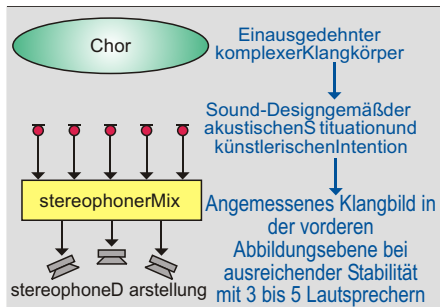


Bild 16. Stereophone Aufnahme zur Umsetzung der künstlerischen Intentionen

monophonen Einzelstützen durchzuführen. In vielen Fällen wird das klangliche Ergebnis eines zwei- oder mehrkanaligen Hauptmikrophons mit Hilfe der Stützmikrophone optimiert, oder umgekehrt die Mischung aus den Stützsensoren wird mit Hilfe des Hauptmikrophons klanglich perfektioniert. Ebenso werden einzelne Instrumentengruppen oder ausgedehnte Klangkörper mit stereophonen Stützmikrophonen aufgenommen. **Bild 16** zeigt an Hand des Chors die Situation einer stereophonen Aufnahme: Das Sounddesign richtet sich einerseits nach der akustischen Situation (Eigenschaften des Aufnahme-raums) und andererseits nach gestalterischen und künstlerischen Absichten des Tonmeisters. Der Tonmeister erschafft so eine gewünschte Abbildung des Chors über die Lautsprecher.

4.1.3. Ansatz für die Einbindung der Stereophonie

Die offensichtlichen Vorteile der Stereophonie lassen sich im Prinzip nutzen bei Einbindung der bewährten Aufnahmetechniken gemäß **Bild 17**. Dargestellt ist zunächst die reguläre Übertragung eines Solisten gemäß den Vorschriften der Wellenfeldsynthese, also die separate Übertragung der Nahfeld-Aufnahme und der dazugehörigen Raumimpulsantwort. Für die Aufnahme des Chors ist dagegen eine konventionelle stereophone Technik vorgeschaltet. Die Mischung des Chors sollte

so beschaffen sein, dass sie einerseits möglichst wenig Rauminformation enthält, andererseits aber die flächige Verteilung der Chormitglieder adäquat wiedergibt. Dieses dreikanalige stereophone Signal wird in der folgenden WFS-Übertragungskette wie drei diskrete Einzelquellensignale behandelt, also ebenfalls zusammen mit den zugehörigen Raumimpulsantworten übertragen. Die drei WFS-Signale repräsentieren somit virtuelle „Lautsprecher“, die das stereophone Klangbild des Chors im Aufnahme-raum wiedergeben.

Vorteile der stereophonen Übertragungstechnik können auf diesem Wege genutzt werden, um die Eigenschaften der WFS-Technik entscheidend zu verbessern. Auf Einzelheiten des Konzepts wird im Kapitel 5 eingegangen.

5. 'Virtual Panning Spot' (VPS)

Die stereophonen Signale erzeugen auf der Wiedergabeseite des WFS-Kanals „virtuelle Lautsprecher“, die das stereophone Klangbild eines ausgedehnten Klangkörpers (beispielsweise eines Chors) im Aufnahme-raum wiedergeben. Diese speziellen virtuellen Quellen heißen „Virtual Panning Spots“ (VPS), im **Bild 18** als blaue Punkte dargestellt.

Da die VPS virtuelle Quellen darstellen, müssen für den wiedergabeseitigen Rendering-Prozess natürlich auch die passen-

den Raumimpulsantworten zur Verfügung stehen. Diese können im Ursprungsraum gemessen oder — wie bereits erwähnt — geeignet synthetisiert werden. Im Beispiel (s. Bild 18) wird der Chor von drei VPS dargestellt, die per Wellenfeldsynthese wiedergegeben werden und dadurch hinsichtlich Lokalisation, Ausdehnung und Entfernung relativ frei konfigurierbar sind.

Man kann natürlich den Chor auch mittels zweier VPS wiedergeben (zwei virtuelle Lautsprecher), was beispielsweise einer 2/0-Stereo-Anordnung entspräche (zwei Übertragungskanäle, linker und rechter blauer Punkt im Bild 18). Aufgenommen würde der Chor in diesem Fall zum Beispiel mit einem ORTF-Mikrofon, und die beiden Kanäle würden direkt als VPS-Signale übertragen.

Der klangliche Vorteil des Konzepts liegt auf der Hand: Die stereophone Aufnahme des Chors erzeugt im Gesamtbild einen großen Klangkörper, denn es existiert eine Abbildung zwischen den VPS nach den Gesetzen der Lokalisation von Phantomschallquellen. Die „Lautsprecher“ sind virtuelle Quellen, per WFS synthetisch generiert und mit den räumlichen Eigenschaften des Aufnahme-raums versehen. Die Orte der VPS verhalten sich für den Bereich der Hörzone richtungsstabil. Die bekannten Nachteile der Phantomschallquellenlokalisierung, insbesondere die geringe Richtungsstabilität, lassen sich leicht vermeiden, indem eine ausreichende Anzahl an VPS gesetzt werden, beispielsweise 3 bis 5 VPS für den vorderen Abbildungsbereich. Das ist allein eine Frage der technischen Möglichkeiten während der Aufnahme und der verfügbaren Übertragungskapazität, nicht aber eine Frage der Lautsprecheranordnung beim Hörer.

„Virtual Panning Spots“ sind ausgewählte Punkte (virtuelle Lautsprecher), die in der virtuellen Darstellungsebene einen stereophonen Darstellungsbereich erzeugen. Sie sind je nach Aufnahmesituation und gewünschter Abbildung im Prinzip frei wählbar. Dieser Sachverhalt ist im **Bild 19**

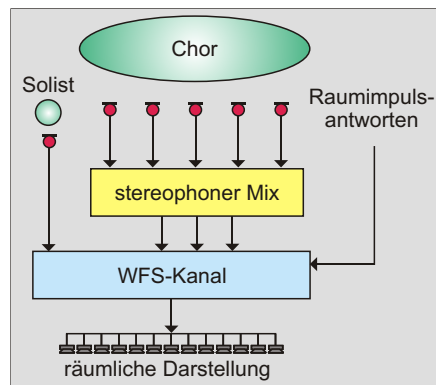


Bild 17 (oben). Implementierung stereophoner Techniken in das WFS-Übertragungssystem

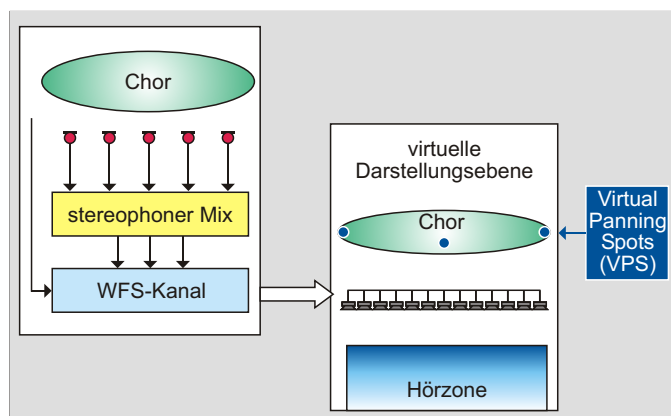


Bild 18 (links). 'Virtuelle Panning Spots' zur Einbindung stereophoner Techniken

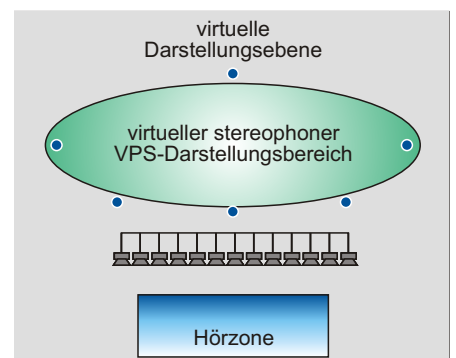


Bild 19. Sechs VPS zum Aufspannen eines stereophonen Darstellungsbereichs

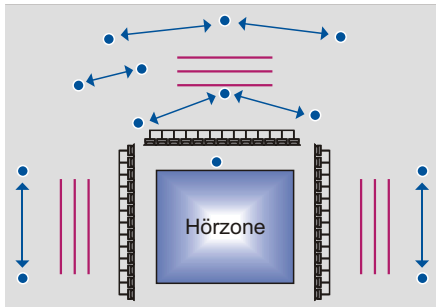


Bild 20. Beispiel für die Konfiguration der stereophonen Darstellungsbereiche

gezeigt. Der grüne stereophone Darstellungsbereich kann durch beliebig viele VPS in beliebiger räumlicher Ausdehnung „aufgespannt“ werden, je nach Situation und Intention. Die Anzahl und Verteilung der VPS hängt von folgenden Kriterien ab:

- Größe und Form des homogenen Klangkörpers,
- Umstände der Produktion,
- künstlerische und gestalterische Intention des Tonmeisters und
- verfügbare Übertragungskapazität.

Die künstlerische Gestaltung des Klangbildes bei der WFS-Übertragung beginnt mit Wahl, Zweckbestimmung und Positionierung der VPS. Vier wichtige Parameter sind zu nennen, die dem Tonmeister neuartige Möglichkeiten der räumlichen Tongestaltung in die Hand geben (**Bild 20**):

- 1) Die Anzahl der stereophonen Darstellungsbereiche ist im Prinzip beliebig. Aus künstlerischer Sicht sollte sie sich an der Zahl der ausgedehnten Klangkörper orientieren (im großen Orchester zum Beispiel Streichergruppen, Blechbläsergruppen, Chor).
- 2) Werden Lautsprecherarrays auch seitlich der Hörzone installiert, so gibt es für die Seiten keine prinzipiellen Probleme hinsichtlich der Richtungsstabilität, denn ein seitlicher stereophoner Darstellungsbereich kann aus einer hinreichenden Anzahl stabiler VPS aufgebaut werden. Entsprechendes gilt für den Bereich hinter dem Hörer.
- 3) Ein stereophoner Darstellungsbereich lässt sich nicht nur in alle Richtungen verschieben, dehnen oder stauchen, sondern auch in weitem Bereich mit unterschiedlichen Entfernungen darstellen. Eine Tiefenstaffelung ist damit leicht realisierbar (zum Beispiel Chor in den Hintergrund, Streicher in den Vordergrund).

- 4) Im gewissen Rahmen (s. Kap. 3.3.1 und Bild 5) können die VPS und damit auch die stereophone Abbildungsbereiche in Entfernungen zwischen dem Hörer und dem Lautsprecherarray gelegt werden. Die virtuelle Darstellungsebene reicht damit theoretisch bis dicht an den Hörer heran und erlaubt daher eine ausdrucksvolle Tiefenstaffelung.

Das im Bild 20 gezeigte praktische Anwendungsbeispiel enthält verschiedene neue Möglichkeiten der räumlichen Klanggestaltung. Insgesamt sind 13 VPS eingesetzt, wobei die entfernteren etwa gemäß des 3/4-Stereo ITU-Standards angeordnet sind und in bekannter Weise als stereophone Darstellungsbereiche fungieren (s.a. [3], Kap. 3). Im Bühnenbereich befinden sich eindimensionale stereophone Darstellungsbereiche in drei verschiedenen Entfernungen, und auch die Seitenbereiche sind für stereophone Abbildungen vorbereitet. Ferner ist eine monophone virtuelle Quelle ganz vorn zwischen Hörzone und Lautsprecherarray (entsprechend Abschnitt 3.3.1) vorgesehen.

Die einzelnen stereophonen Darstellungen sollten den (trockenen) Direktschall flächiger, ausgedehnter Klangkörper enthalten, so wenig Raumanteil wie möglich. Die konventionellen Werkzeuge zur Darstellung von räumlicher Tiefe (Generierung geeigneter Seitenreflexionen) sind im Konzept der Wellenfeldsynthese überflüssig und sogar schädlich, da hier mit den virtuellen Quellen (und VPS) die zugeordnete Entfernungsinformationen (in Form der Raumimpulsantworten) vorhanden ist (s. Kap. 3.3.2).

Im Bild 20 stellen die parallelen Linien die ebenen Wellen für die Nachhall-Synthese dar (Kap. 3.3.4). Der Nachhall wird nicht mit Hilfe von VPS erzeugt. Vielmehr befindet sich die aussendende Quelle einer ebenen Welle theoretisch unendlich weit entfernt.

5.1. Praktische Aspekte und Erfahrungen

5.1.1. Erzeugung der VPS

Da ein VPS nichts anderes als eine virtuelle Quelle im Sinne der WFS repräsentiert, wird für die VPS-Erzeugung das gleiche Verfahren angewendet, wie für eine einzelne reale Schallquelle, die mit WFS wiedergegeben werden soll. Sind die Orte und die Anzahl der VPS bei einer Aufnahme für WFS gefunden, werden an den

VPS-Orten geeignete Lautsprecher im Aufnahmerraum positioniert. Der Aufnahmerraum wird damit angeregt, mittels Mikrofonarray die Raumantwort gemessen und daraus die Impulsantwort errechnet. Anstelle einer messtechnischen Ermittlung der Raumimpulsantworten können ebenso modellbasierte Verfahren eingesetzt werden.

Natürlich müssen für einen bestimmten Saal derartige Ermittlungen der Raumimpulsantworten nicht jedes Mal vor einer Aufnahme erfolgen. Vielmehr stehen diese einmal ermittelten Daten in einer Datenbank dauerhaft zur Verfügung. Auch können Impulsantworten aus anderen Sälen manchmal erwünscht sein (vergleichbar mit dem Einsatz moderner Hallgeräte, die die raumakustischen Eigenschaften bestimmter Säle nachbilden).

5.1.2. Reduzierung der Übertragungskanäle und Rechenkapazität

Mit der Benutzung des VPS-Konzepts kann der Bedarf an Übertragungskanälen entscheidend verringert werden. Je größer ein Klangkörper, und damit die Zahl einzelner beteiligter Instrumente, desto höher die Einsparung an Übertragungskanälen. Bei kleinem Ensemble oder Einzelinstrumenten jedoch spart das VPS-Konzept keine oder nur wenig Übertragungskanäle ein. Diese resultierende Reduzierung wurde bereits in Kapitel 3.2 erläutert.

Ein nicht unbedeutender Effekt, der mit der Reduzierung an Übertragungskanälen einhergeht, ist die Verringerung des Bedarfs an Rechenkapazität. Das (etwas extreme) Beispiel des Chors mit einer Besetzung von 50 Sängern macht das deutlich (Array mit 48 Mikrofonpositionen für die Impulsantwortmessung, Array mit 24 Lautsprechern für die Wiedergabe). Bei der Extrapolation und Faltung werden jeweils 47 Rechenschritte eingespart, das ist die 16fache Verkürzung der Rechen-dauer (**Tabelle II**).

5.1.3. Produktion und Gestaltung des Klangbilds

Ein wesentlicher Gewinn bei Nutzung des VPS-Konzepts ist die bessere Handhabung der Aufnahmetechniken und die Qualitätsverbesserung der Wiedergabe bei der WFS-Übertragung. Die Handhabung des VPS-Konzepts basiert auf der Anwendung stereophoner Techniken, die jedem Tonmeister geläufig sind. Es gibt keine völlig neuen Mikrofonierungstechniken, die Arbeitsweise bleibt in weiten Bereichen dieselbe wie bei herkömmlichen Produktionen (bis auf die Entfernungsdarstellung, sie ist mit der Konfigu-

Tabelle II. Anzahl der Rechenschritte ohne und mit VPS am Beispiel des Chors

	Übertragungskanäle	Extrapolation	Faltung	Entzerrung
ohne VPS	50	50×48 IRs	50×24 IRs	24
mit VPS	3	3×48 IRs	3×24 IRs	24

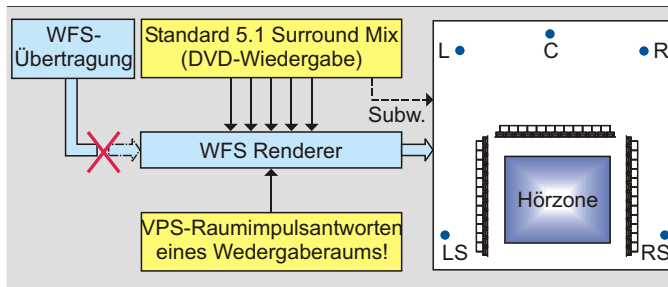


Bild 21 (links). VPS als virtuelle Lautsprecher gewährleisten Kompatibilität

Bild 22 (unten). Virtuelle 3/2-Stereo-Lautsprecheranordnung im virtuellen Abhörraum

WFS-gestützten virtuellen Lautsprecher, könnten schon in naher Zukunft zum ersten Markterfolg der Wellenfeldsynthese führen. Dabei ist nicht nur an die Anwendung im Heim (Home Theatre) gedacht, sondern auch an den Einsatz in Kinos, Theatern oder ähnlichen Wiedergaberäumen. Verfahren der WFS-Übertragung werden wohl erst später folgen.

Schrifttum

- [1] Theile, G.: Zur Theorie der optimalen Wiedergabe von stereophonen Signalen über Lautsprecher und Kopfhörer. RMT 25, 1981, S. 155-170.
- [2] Theile, G.: On the Naturalness of Two-Channel Stereo Sound. J. Audio Eng. Soc. 39, No. 10, 1991, S. 761-767.
- [3] Theile, G.: Multichannel natural music recording based on psychoacoustic principles. AES 19th International Conference June 2001, Proceedings S. 201-229. Updated version see www.irt.de/wittek/hauptmikrophon/theile/Multich_Recording_30.Oct.2001_.PDF
- [4] Mackensen, P.; Reichenauer, K.; Theile, G.: Einfluss der spontanen Kopfdrehungen auf die Lokalisation beim binauralen Hören. 20. Tonmeisterstagung Karlsruhe, 1998, Tagungsband S. 218-228
- [5] Mackensen, P.; Fruhmann, M.; Thanner, M.; Theile, G.; Horbach, U.; Karamustafaoglu, A.: Head-Tracker Based Auralization Systems: Additional Consideration of Vertical Head Movements. 108th AES Convention, 2000, Preprint 5135.
- [6] Berkhout, A. J.; de Vries, D.; Vogel, P.: Acoustic Control by Wave Field Synthesis. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 93, S. 2764-2778, 1993.
- [7] Boone, M.M., Verheijen, E.N.G.; van Tol, P.F.: Spatial sound field reproduction by wave field synthesis. J. Audio Eng. Soc., Vol. 43, S. 1003...1012, 1995.
- [8] Geiger, H.; Scheel, K.: Handbuch der Physik, Band VIII. Verlag Julius Springer, Berlin, 1926.
- [9] Franke, H.: dtv-Lexikon der Physik, Band 4. dtv-Verlag, München, 1969.
- [10] Horbach, U.; Boone, M.: Practical Implementation of Data-based Wave Field Reproduction System. 108th AES Convention, 2000, Preprint.
- [11] Verheijen, E.: Sound reproduction by wave field synthesis. Delft University of Technology, 1997.
- [12] de Vries, D.; Hulsebos, E.; Bourdillat, E.: Auralization by Wave Field Synthesis. 21. Tonmeisterstagung Hannover, 2000, S. 121-128
- [13] Felderhoff, U.; Mackensen, P.; Theile, G.: Stabilität der Lokalisation bei verfälschter Reproduktion verschiedener Merkmale der binauralen Signale. 20. Tonmeisterstagung Karlsruhe, 1998, Tagungsband S. 229-237.
- [14] Boone, M.; de Bruijn, W.; Piccolo, T.: Sound Recording Techniques for Wavefield Synthesis and Other Multichannel Systems. 104th AES Convention, 1998, Preprint 4690.
- [15] Boone, M.: Persönliche Mitteilung.
- [16] Wittek, H.: OPSI - Optimised phantom source imaging. Internal Carrouso Paper, München, 2002. www.irt.de/wittek/hauptmikrophon/OPSI_Paper.pdf
- [17] Boone, M.; de Bruijn, W.; van Rooijen W.: Virtual surround speakers by wave field synthesis. 21. Tonmeisterstagung Hannover, 2000, S. 129 to 140.
- [18] Feredikis, C.: DML – Distributed Mode Lautsprecher – Ein neuer Schallwandler, akustische Eigenschaften und die Konsequenzen für den praktischen Einsatz. 20. Tonmeisterstagung Karlsruhe, 1998, Tagungsband S. 810-827.
- [19] Boone, M.; de Bruijn, W.: On the applicability of distributed mode loudspeaker panels for wave field synthesis based on sound reproduction. 108th AES Convention, 2000, Preprint 5165

ration der VPS automatisch gegeben). Auch der Mix auf die VPS-Positionen benötigt keine neuen Methoden, sondern hier werden ebenso konventionelle Panning- und Mischtechniken verwendet. Bei dem benötigten Equipment wird im Vergleich zur reinen WFS-Technik wesentlich eingespart. Die Anzahl der Mikrophone bleibt in etwa die gleiche, wie für eine entsprechende Stereoaufnahme.

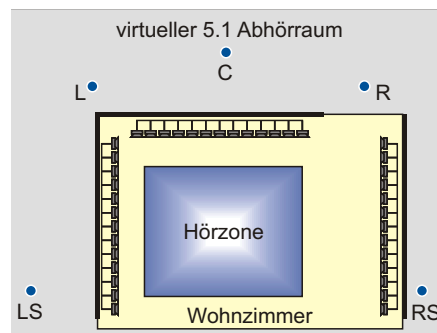
Die Aufnahme nach dem VPS-Konzept hat also den entscheidenden Vorteil, dass der Tonmeister geläufige stereophone Arbeitsweisen unmittelbar einsetzen kann.

Die Qualitätsverbesserung der räumlichen Übertragung mittels Wellenfeldsynthese geht Hand in Hand mit dem Einsatz stereophoner Techniken. Der Tonmeister hat deutlich mehr Einfluss auf wichtige Qualitätsmerkmale einer Aufnahme, er verfügt über einen großen Gestaltungsspielraum hinsichtlich der räumlichen Parameter, und er kann die Klangfarbe stärker beeinflussen.

5.2. Kompatibilität mit Zwei- und Mehrkanalstereophonie

Einen wichtigen Sonderfall der VPS-Anwendung kann eine spezielle wiedergabeseitige Voreinstellung der VPS darstellen, die die Wiedergabe von konventionellen Mehrkanal-Aufnahmen in einem virtuellen Abhörraum ermöglicht. Zu diesem Zweck werden für den wiedergabeseitigen WFS-Decoder zwei Maßnahmen, die im Anwendungsfall aktiviert werden können, vorgeschlagen (Bild 21).

- 1) Die Konfiguration der VPS hinsichtlich Raumimpulsantworten und räumlicher Anordnung erfolgt nicht nach Maßgabe der im WFS-Kanal übertragenden Informationen, sondern gemäß der voreingestellten Darstellung virtueller Lautsprecher in einem virtuellen Abhörraum. Beliebige Anordnungen der virtuellen Lautsprecher können voreingestellt sein und abhängig vom wiederzugebenden Stereophonie-Format aktiviert werden.
- 2) Die virtuellen Quellensignale werden nicht aus dem WFS-Übertragungskanal empfangen, sondern vom wie-



dergabeseitigen Mehrkanaldecoder (zum Beispiel eines DVD-Players).

Die WFS-Wiedergabeanlage arbeitet hier völlig losgelöst von einer WFS-Übertragung, kann aber in diesem Modus prinzipiell bereits drei attraktive Vorteile im Vergleich mit einer konventionellen Wiedergabeanlage bieten:

- 1) Diverse stereophone Mehrkanal-Formate lassen sich problemlos durch Wahl einer VPS-Voreinstellung optimal wiedergeben, ohne die Lautsprecheranordnung im Wohnzimmer entsprechend anpassen zu müssen.
- 2) Die virtuellen Lautsprecher können sich auch außerhalb des Wohnzimmers befinden. Das heißt: Auch in beengter Raumsituation ist die Hörzone für Mehrkanal-Stereophonie ausreichend groß (Bild 22).
- 3) Eine hochwertige WFS-Wiedergabeanlage erlaubt eine elektronische Kompensation verschiedener Mängel des Wiedergaberaums, insbesondere die Reduktion der Wirkung von frühen Reflexionen sowie den Ausgleich unsymmetrischer Anordnungen der Lautsprecherarrays. Bild 22 zeigt beispielhaft den praktischen Vorteil.

Diese rein wiedergabeseitige Anwendung der Wellenfeldsynthese für Mehrkanal-Stereophonie könnte aus technischer und praktischer Sicht der erste Schritt für die Durchsetzung auf dem Markt sein. Wichtig ist hier die Entwicklung der MAP-Technologie (s. Kap. 3.3.5). Die flachen, mit einer Glasfaser gespeisten Panels sind im Wohnzimmer meistens besser zu integrieren als Lautsprecherboxen. Die Praktikabilität der Panels, verbunden mit den oben dargestellten Vorteilen der