

Raumsimulation und Klangkunst

Medien und Räumlichkeit

Die Werke von Klangkünstlern gestalten öffentliche Räume mit akustischen Mitteln. Diese Räume können offen oder geschlossen sein, stets aber ist die auditive Erfahrung assoziiert mit einer räumlichen Erfahrung – einer Landschaft, eines urbanen Raums, eines Gebäudes oder einer Installation. Sobald für die auditive Ausgestaltung dieser Orte keine natürlichen Klangquellen, sondern akustische Medien zum Einsatz kommen, und dies ist fast immer der Fall, entsteht bei der Erzeugung, Übertragung, Bearbeitung und Wiedergabe der ihnen zugeordneten Klänge jedoch ein mehrschichtiges Gefüge von räumlichen Informationen. In diesem Gefüge enthalten ist zum einen die räumliche Signatur des verwendeten Quellsignals, zum anderen dessen Manipulation durch Werkzeuge der Audibearbeitung hinsichtlich Balance, Klangfarbe, Dynamik, durch Hinzufügen artifizierlicher räumlicher Merkmale wie Echo oder Nachhall und die Zuordnung zu elektroakustischen Schallquellenpunkten im Raum, und schließlich die Überformung dieser klanglich-räumlichen Merkmale mit der räumlichen Signatur des Rezipienten-Raums.

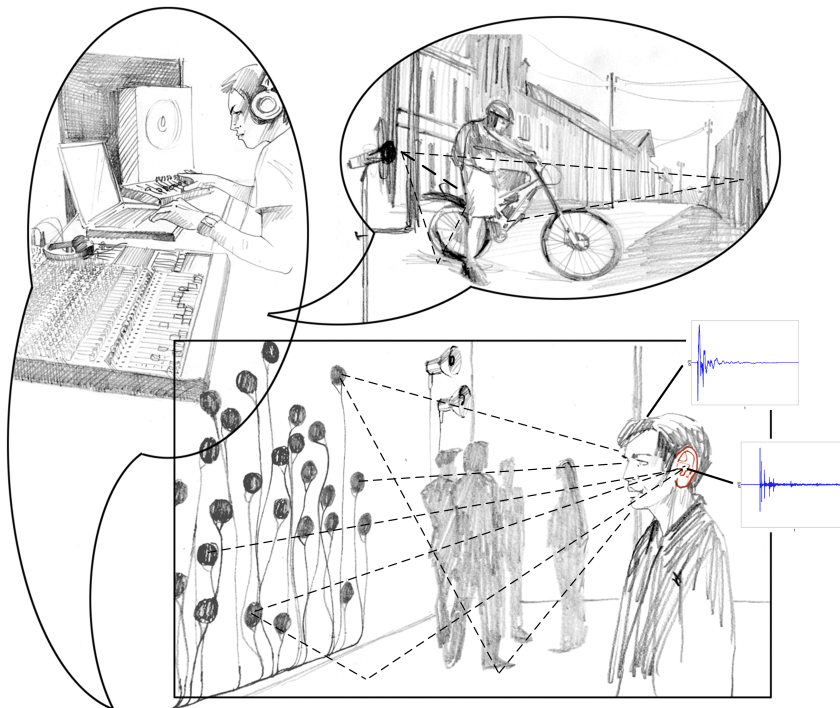


Abb. 1 Überlagerung räumlicher Signaturen bei Aufnahme, Bearbeitung und Wiedergabe von Klang – Skizziert sind einige ausgewählte Schallausbreitungswege und deren Kodierung im Schalldruckverlauf am Trommelfell des Hörers (binaurale Raumimpulsantwort)

Der Begriff der räumlichen Signatur bezeichne hier die Gesamtheit der Merkmale eines physikalischen Klangs (Schallereignis), die für die räumliche Wahrnehmung des Klangs (Hör-

ereignis) maßgeblich sind, d.h. für die Empfindung von Richtung und Entfernung der Schallquelle, der Eigenschaften des sie umgebenden Raums und ihrer Position in ihm. Innerhalb dieser Gesamtheit räumlicher Merkmale sind zeitliche Strukturen (zeitlicher Verlauf von Reflexionen, Echo, Nachhall), räumlich-direktionale Strukturen (Richtung, Entfernung) und spektrale Eigenschaften des Schallfelds für den Raumeindruck wesentlich.

Die beschriebene Überlagerung räumlicher Signaturen verschwindet, wenn Lautsprecher einfache synthetische Signale (Sinustöne, Rauschen) ohne inhärente Räumlichkeit wiedergeben und somit selbst als Quellen angesehen werden können, vergleichbar einem Musikinstrument im Raum. In der Regel sind Lautsprecher aber Medien, d.h. sie stehen *für etwas*: Für einen Sprecher, ein Musikinstrument, einen Wassertropfen – für einen an anderer Stelle und zu anderer Zeit produzierten Klang. In der klassischen Audioproduktion für Tonträger, in der Klassik ebenso wie in der Populärmusik, wird diese inhärente räumliche Mehrdeutigkeit im Sinne einer illusionistischen, aber räumlich kohärenten Klangbildgestaltung weitgehend unterdrückt. In der Klangkunst als musikalisierte Raumkunst par excellence kann sich das künstlerische Potential von räumlichen Interaktionen und Widersprüchen dagegen frei entfalten.

Exemplarisch wird dies in den Klangskulpturen eines Bill Fontana. Durch die elektroakustische Relokation von Klängen in eine fremde urbane Umgebung entsteht ein Konflikt nicht nur zwischen Visuellem und Akustischem und zwischen der Semantik der Geräusche von Aufnahme- und Wiedergabeort, etwa bei der Wiederbelebung der Ruine des Anhalter Bahnhofs in Berlin durch die Klangwelt des belebten Kölner Hauptbahnhofs (*Entfernte Züge*, Berlin 1984). Der Reiz seiner Installationen liegt auch in der perspektivischen Überlagerung von unterschiedlichen räumlichen Dimensionen, etwa bei der Übertragung von Geräuschen der Brooklyn Bridge auf den Platz vor dem (ehemaligen) World Trade Center (*Oscillating steel grids along the Brooklyn Bridge*, New York 1983) und der dabei empfundenen Skalenverschiebung.¹

Während die klassischen Werkzeuge zur Erzeugung und Wiedergabe von räumlichen Merkmalen nur bestimmte, isolierte Teile einer konsistenten räumlichen Signatur erzeugen, wurden in den vergangenen Jahren zwei Verfahren der Virtuellen Akustik bis zur Anwendungsreife entwickelt, deren künstlerisches Potential bisher nur in Ansätzen erprobt ist. Diese Techniken einer Raumsimulation im engeren Sinn zielen auf eine Auflösung der oben skizzierten Mehrschichtigkeit, indem sie den Hörer virtuell in einen akustisch konsistenten Raum versetzen, dessen artifizielle Natur er deswegen nicht mehr erkennt, weil die akustischen Merkmale des Raums vollständig und widerspruchsfrei abgebildet werden.

Die Attraktivität dieser Verfahren als Werkzeug für die Klangkunst liegt einerseits in der Möglichkeit, virtuelle auditive Umgebungen zu schaffen, d.h. Klanglandschaften, deren Schallfelder perzeptiv nicht von denen natürlicher Objekte zu unterscheiden sind. Die Simulation virtueller Räume ist zwar nur *eine* mögliche künstlerische Intention von akustischen Installationen, aber doch eine besonders reizvolle, da sie eine hohe Immersion und Präsenz des Hörers in der neu geschaffenen Klangwelt bewirken kann. Ein zweiter Aspekt liegt in der Möglichkeit, den elektroakustischen Wandler, sei es ein Lautsprecher oder ein Kopfhörer, angesichts der Authentizität der auditiven Umgebung für das wiedergegebene Klangobjekt durchsichtig und als Medium transparent werden zu lassen.

Im folgenden soll zunächst die Entwicklung der klassischen Werkzeuge der Raumsimulation und deren Verwendung innerhalb der Elektroakustischen Musik skizziert werden – nicht zuletzt, um den Unterschied zu diesen neuen Verfahren der Virtuellen Akustik deutlich zu machen.

Nachhall

Das älteste Werkzeug zur Erzeugung von Nachhall waren Hallräume, wie sie unmittelbar nach der Ablösung der rein mechanisch-akustischen Aufnahmeverfahren durch elektroakustische Verfahren mit Mikrofon, Lautsprecher und elektromagnetischem Schneidesystem eingerichtet wurden. Dieser Wandel vollzog sich um 1925 in der Schallplattenindustrie und im noch jungen Medium des Rundfunks und ermöglichte zum ersten Mal die Mischung von an verschiedenen Orten aufgenommenen, mikrofonierten Klängen auf elektrischem Wege. Diese Option konnte genutzt werden, um Signale über Lautsprecher in einen Raum mit stark reflektierenden Wänden einzuspielen, über Mikrofone zurückzuführen und dem Quellsignal als räumlichen Anteil zuzumischen. In den 1930er Jahren war dies gängige Praxis in den Aufnahmestudios bei Rundfunk und Schallplatte, ebenso wie beim Film.² Anfang der 1950er Jahre verfügte auch der Nordwestdeutsche Rundfunk (NWDR) in Köln über drei Hallräume, die in erster Linie für die Hörspielproduktion eingesetzt wurden. Durch hausinterne Verschaltung konnten sie allerdings auch dem 1951 eingerichteten Elektronischen Studio zugänglich gemacht werden. Mit diesen natürlichen Hallräumen wurden die Verhallungen für Stockhausens *Studie II* und *Gesang der Jünglinge* erzeugt. Die Gestaltung des Nachhalls beschränkte sich in der Praxis auf die Auswahl des passenden Raums, falls – wie in Köln – mehrere Räume unterschiedlicher Größe und unterschiedlicher Nachhallzeit zur Verfügung standen, und auf die Balance, mit der das Nachhallsignal in der Mischung eingesetzt wurde.

1957 brachte die deutsche Firma EMT mit der Hallplatte EMT 140 das erste Verfahren zur Erzeugung von Nachhall auf elektronischem Wege auf den Markt: Eine dünne, rechteckige, an ihren Eckpunkten eingespannte Stahlplatte wurde zu Biegeschwingungen angeregt, die sich – ähnlich wie Schallwellen im Raum – entlang der Plattenoberfläche ausbreiteten und an den Kanten reflektiert wurden. Dieses Reflexionsmuster wurde an einer anderen Stelle der Platte abgenommen und in ein elektrisches Signal zurückverwandelt.³ Das Nachfolgemodell, die 1971 eingeführte Hallfolie EMT 240, verwendete nur noch eine Folie aus einer Gold-Legierung mit einer höheren, einem natürlichen Raum ähnlicheren Eigenfrequenzdichte. Die geringe Eigenfrequenzdichte war hauptverantwortlich für den metallischen und tendenziell kleinräumigen Klang der Hallplatte.

Im Gegensatz zur üblichen Tonstudiopraxis der 1950er Jahre stand in der Elektronischen Musik der Kölner Schule der Aspekt der Raumsimulation beim Einsatz von Nachhall nicht im Vordergrund. In Erinnerungen von Robert Beyer, Tonmeister und Mitbegründers des Kölner Studios, schwingt im Rückblick auch ein gewisses Unbehagen gegenüber dem in der Anfangsphase verwendeten, rein synthetischem Klangmaterial mit, dem durch Verhallung ein gewisser Grad an Natürlichkeit zurückgegeben werden konnte⁴ – ein Problem, das etwa in der *musique concrète* nicht bestand, wo das Klangmaterial bereits durch die Aufnahme mit einer räumlichen Signatur versehen war. In den frühen Werken Stockhausens und Gottfried Michael Koenigs allerdings kommt Nachhall überwiegend nicht als akustisches Attribut eines Klangs, sondern als eigenständiges, synthetisches Klangmaterial zum Einsatz. In *Studie II* ist der Nachhall eines durch Arpeggien von Sinustönen angeregten Hallraums zu hören. Da der Anregungs-Klang jedoch abgeschnitten ist, hat der Nachhall eher die Qualität von gefiltertem Rauschen als dass er die Akustik eines natürlichen Raums simulieren würde. Spätere Stücke wie Stockhausens *Gesang der Jünglinge* oder Koenigs *Klangfiguren II* verwenden Nachhall als seriell parametrisierten Prozess der Klangumformung, mit trockenem und verhalltem Signal als Extreme und Zwischenstufen mit unterschiedlicher Balance von Anregung und Nachhall und unterschiedlicher Nachhallzeit. Die Montage von Nachhallsegmenten vor den Anregungsklang und die Vertauschung der Zeitrichtung in *Klangfiguren II* (Abb. 2) unterstreicht die Eigenständigkeit dieser Klangobjekte.

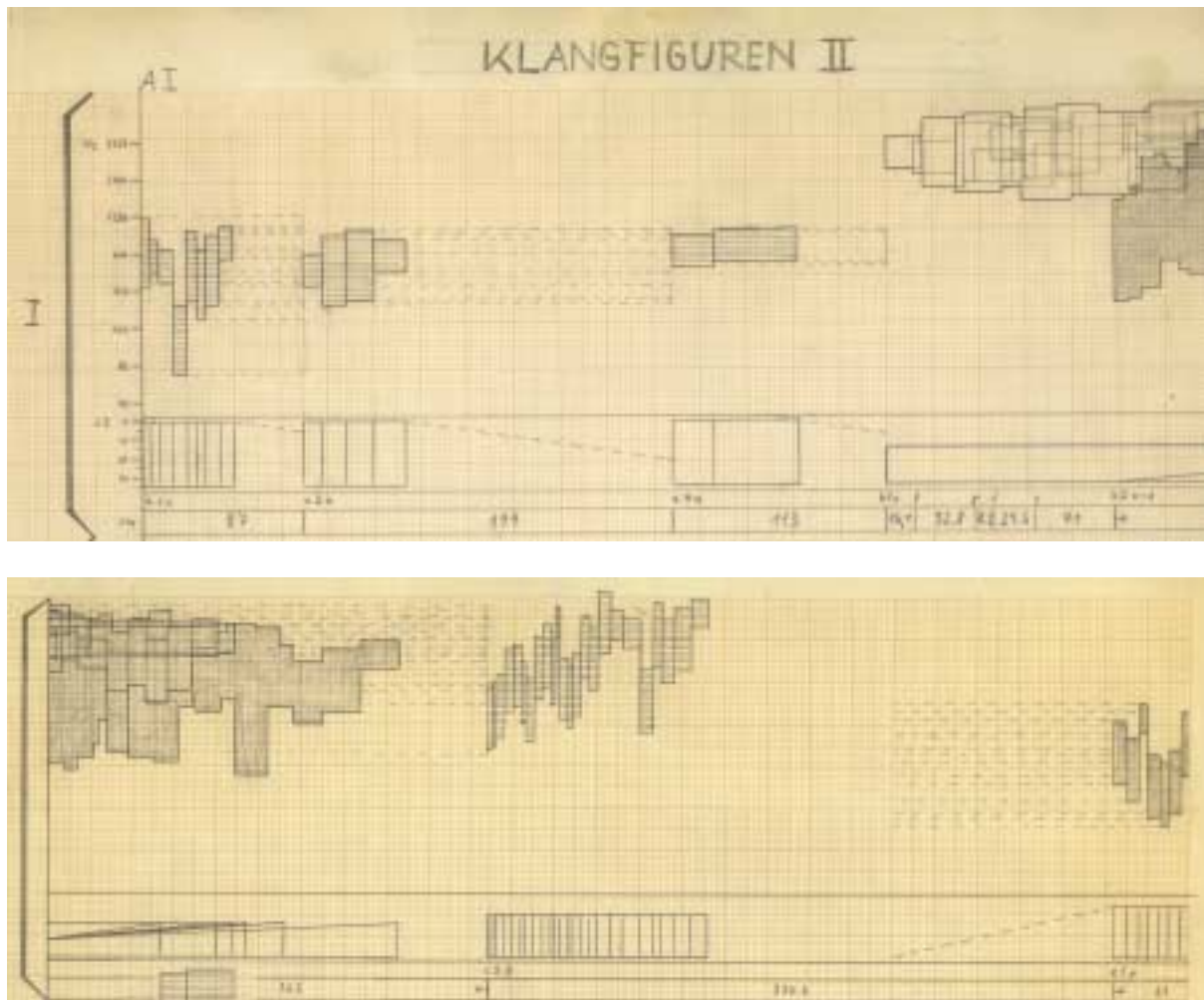


Abb. 2 Nachhall als Klangobjekt (gestrichelte Linien) in der Partitur von *Klangfiguren II*
 Rechts Unten ein gegen die natürliche Zeitrichtung montiertes Nachhallsegment

Eine der ersten Kompositionen, in denen die Hallplatte EMT 140 zum Einsatz kam, war Stockhausens *Kontakte*. Um Beziehungen (Kontakte) zwischen den Charakteren verschiedener Schlaginstrumente herzustellen, wurde das elektronische Klangmaterial in Gruppen von metallischen, holzähnlichen oder fellähnlichen Klängen kategorisiert. Der metallische Charakter wurde unter anderem durch wiederholte Verhallung von elektronischen Pulsen mit der Hallplatte erreicht, deren metallischer Charakter die Funktion einer instrumentalen Klangfarbe übernimmt. Die Schaffung einer „natürlichen“ akustischen Umgebung wäre angesichts des Bekenntnisses zu neugeschaffenem, artifiziellem Klangmaterial wohl als Rückschritt angesehen worden.

Algorithmen zur Erzeugung von Nachhall durch digitale Signalverarbeitung wurden bereits Anfang der 1960er Jahre vorgeschlagen.⁵ Durch rekursiv angesteuerte Verzögerungsglieder konnte ein nachhallähnliches Reflexionsmuster erzeugt werden, auch wenn zunächst keine Rechnerarchitektur zur Verfügung stand, um Algorithmen dieses Typs in Realzeit auszuführen. In die Computermusik, für die nicht notwendigerweise in Echtzeit realisierte Berechnung von Kompositionen, wurden rekursive Nachhallalgorithmen jedoch sehr früh integriert, etwa in das Mitte der 1960er Jahre am Computer Center for Research in Music and Acoustics (CCRMA) in Stanford von John Chowning entwickelte Programm zur räumlichen Steuerung

von Schallquellen,⁶ das zum ersten Mal bei *Turenas* (1972) zum Einsatz kam. Mitte der 1970er Jahre wurde die Erzeugung von digitalem Nachhall in Echtzeit auf einem industriellen Großrechner demonstriert,⁷ bevor wiederum der Firma EMT die erste Implementierung eines rekursiven Nachhallalgorithmus auf einem tonstudiotauglichen Digitalrechner gelang. Das 1976 vorgestellte digitale Nachhallgerät EMT 250, ebenso wie das zwei Jahre später vorgestellte Konkurrenzprodukt der amerikanischen Firma Lexicon (Lexicon 224), erlaubte einen viel weitergehenden Zugriff auf einzelne Parameter und Klangeigenschaften des Nachhalls, als dies bei analogen Geräten möglich war. In der Folgezeit wurde die zunehmende Rechenleistung von Mikroprozessoren genutzt, um sowohl die Übertragungsqualität der Nachhallerezeuger (Frequenzumfang/Abtastfrequenz, Auflösung/Wortbreite) als auch die Komplexität der implementierten Algorithmen zu steigern.⁸ Seit Anfang der 1990er Jahre wurden Nachhallalgorithmen in Softwareumgebungen zur Realisation Elektroakustischer Musik integriert, wodurch auf externe Effektprozessoren verzichtet werden konnte. Das ambitionierteste Projekt dieser Art ist die am IRCAM in Paris entwickelte und seit 1995 unter der grafischen Oberfläche Max verfügbare Programmbibliothek *Spatialisateur*.

Seit Ende der 1990er Jahre ist die Rechenleistung von Prozessoren hoch genug, um nicht nur rekursive Algorithmen, d.h. durch Softwaredesign erzeugte, nachhallähnliche Muster durch rückgekoppelte Verzögerungselemente zu verarbeiten, sondern auch sogenannte Faltungsalgorithmen in Echtzeit auszuführen. Durch diesen Prozess, der höhere Anforderungen an die Rechenleistung stellt als rekursive Algorithmen, kann jedem Klang ein natürlicher, in einem realen Raum aufgenommener Nachhall aufgeprägt werden. Seit der Einführung einer algorithmischen Lösung, die gleichzeitig den Aufwand und die Latenz der Berechnung minimiert, d.h. das Ergebnis der Faltung am Ausgang des Prozessors praktisch verzögerungsfrei zur Verfügung stellt,⁹ wurde auch dieses Verfahren zunächst auf externen DSP-Architekturen realisiert,¹⁰ seit einigen Jahren ist es auch in Form von Plugins für Programme wie Max/MSP, SuperCollider oder CSound verfügbar.

Im Hinblick auf eine Simulation natürlicher Räume kann die Erzeugung von rein zeitlichen Nachhallstrukturen mit Einführung dieser Faltungsalgorithmen im Grundsatz als gelöst angesehen werden. Die durch die Faltung aufgeprägte zeitliche Signatur unterscheidet sich in keiner Weise von dem im realen Raum entstehenden Nachhallverlauf. Lediglich die für eine konsistente Raumsimulation erforderliche räumliche Zuordnung der einzelnen Schallreflexionen im Nachhall zu ihren korrekten Einfallrichtungen ist damit noch nicht gelöst. Sie erfordert zusätzlich ein geeignetes, räumliches Wiedergabesystem.

Raumklang

Klänge durch ein geeignetes akustisches Wiedergabesystem frei im Raum positionieren zu können, war seit Beginn der Tonaufzeichnung ein Innovationsantrieb der Audiotechnik. Im Bereich der klassischen Audioindustrie erwies sich der Tonträger für lange Zeit als Engstelle einer mehrkanaligen Übertragung: Erst 1954 stand mit der stereophon geschnittenen Plattenrinne ein Medium für zweikanalige Übertragung zur Verfügung. Die Quadrofonie blieb in den 1970er Jahren ein Intermezzo, da sich – neben systembedingten, technischen Unzulänglichkeiten – die Audioindustrie nicht auf einen einheitlichen Standard für einen vierkanaligen Tonträger einigen konnte. Erst mit den neuen, Ende der 1990er Jahre eingeführten digitalen Medien (DVD, SACD, HD-DVD, BlueRay Disc) ist eine vielkanalige Wiedergabe auch im Heimbereich möglich geworden. Überall da, wo nicht die Distribution von Tonträgern im Vordergrund stand, verlief die Entwicklung räumlicher Wiedergabesysteme schneller: Im Bereich des Filmtons ebenso wie in der Elektroakustischen Musik.

Nach 1945 entwickelten sich hier eine Vielzahl von Ansätzen der Raumklangsteuerung. Im Bereich der französischen *musique concrète* verwendeten Pierre Schaeffer und Pierre Henry, bereits 1950 ein vierkanaliges System mit Lautsprechern links und rechts vor, hinter und über dem Publikum, angesteuert von vier monofonen Magnetbändern (*Symphonie pour un Homme Seul*, 1950). Im Umkreis der amerikanischen *tape music* entstanden um die gleiche Zeit Tonbandkompositionen für acht kreisförmig um das Publikum angeordnete Lautsprecher, dazu gehören Stücke wie *Williams Mix* (John Cage, 1952), *Octet I und Octet II* (Earl Brown, 1952/53) oder *Intersection* (Morton Feldman, 1953). Während diese Stücke unsynchronisierte, monofone oder stereofone Bänder benutzten, entstanden im Elektronischen Studio des WDR in Köln mit Koenigs *Klangfiguren II* (1956), Stockhausens *Gesang der Jünglinge* (1956) und *Kontakte* (1960) erste Kompositionen für die zu dieser Zeit entwickelten, vierkanaligen Magnetbandformate und ein quadrofone Wiedergabe mit den Lautsprechern an den Ecken eines Quadrats um das Publikum.¹¹

Neben einer Vielzahl von technischen Realisierungen kristallisieren sich bereits in den 1950er Jahren unterschiedliche ästhetische Konzepte im Umgang mit Raumklang heraus. In der als *akusmatische Musik* bezeichneten, sich aus der *musique concrète* entwickelnden Schule ist Raumklang eher ein Resultat der *Aufführung* als ein Merkmal der Komposition selbst. Die räumliche Zuordnung von Klängen zu den einzelnen Lautsprechern ist nicht vom Komponisten festgelegt, sondern wird während der Wiedergabe *interpretiert*. Das Quellmaterial ist in der Regel stereofon und wird erst während der Aufführung einzelnen Gruppen eines Lautsprecherorchesters zugeordnet. Einen noch größeren Freiraum der Interpretation findet man bei den Kompositionen des Niederländers Jan Boerman, der für die Aufführung von Stücken wie *Komposition 1989* oder *Tellurisch* (1991) achtkanalige Bänder zur Verfügung stellt, für die weder die räumliche Zuordnung noch die dynamischen Beziehungen der einzelnen Spuren fixiert sind. Stattdessen muss ein Interpret die Aufführung mithilfe einer Partitur „einstudieren“ und seine eigene Ausführung finden, die von Interpret zu Interpret und von Aufführung zu Aufführung unterschiedlich sein kann.

In der frühen elektronischen Musik der Kölner Schule dagegen dient die räumliche Wiedergabe überwiegend der Artikulation struktureller Aspekte der Komposition selbst. In *Klangfiguren II* entfalten sich die kontrapunktischen Beziehungen ähnlicher, in Zeit und Tonhöhe subtil verschobener Klangstrukturen in der räumlichen Zuordnung zu vier Lautsprechern. Darüber hinaus ist die zentrale Position des Publikums, umgeben von einem quadrofonen Lautsprechersystem, ein demokratischer Gegenentwurf zur traditionellen Rezeptionssituation des auf die Bühne ausgerichteten, *empfangenden Auditoriums*, wie sie durch die Konzertsäle des 19. Jahrhunderts etabliert wurde. Vor dem Hintergrund einer strukturellen Kontrolle räumlicher Wirkungen durch den Komponisten wird etwa in den Werken Gottfried Michael Koenigs auch die stereofone Abbildung von Klängen als Phantomschallquelle *zwischen* zwei Lautsprechern nur sehr selten eingesetzt, denn die wahrgenommene Position solcher stereofoner Klangquellen ist stark von der Position des Hörers abhängig und entzieht sich somit bei einem größeren Auditorium der Kontrolle des Komponisten.

Hybride Systeme

Besonders zukunftsweisend im Hinblick auf eine Raumsimulation erscheinen im Rückblick Verfahren und Systeme zur Erzeugung räumlich-direktionaler *und* zeitlicher Strukturen einer räumlichen Signatur von Klangquellen. In den Philips Research Laboratories in Eindhoven wurde Anfang der 50er Jahre eine erste Anlage entwickelt für die Erzeugung künstlichen

Nachhalls in Konzertsälen, die als zu trocken empfunden wurden. Das 1953 vorgestellte System zeichnete ein auf der Bühne abgenommenes Mikrofonsignal auf eine rotierende magnetische Scheibe auf und spielte das über eine Reihe von Wiedergabeköpfen abgenommene, verzögerte Signal über Lautsprechergruppen in den Konzertsaal zurück (Abb. 3).

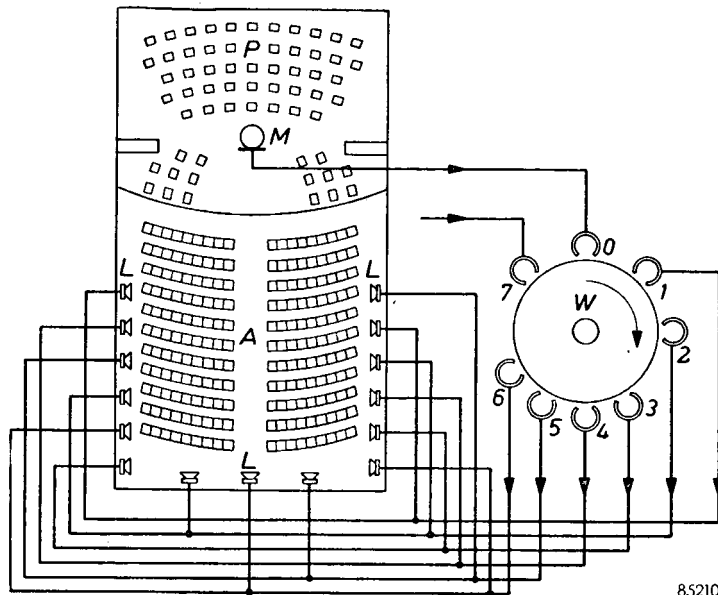


Abb. 3 Nachhallverlängerung für Konzertsäle (Philips 1953)¹²

Das im Haus der Künste und Wissenschaften in Den Haag, im Théâtre National Populaire in Paris und 1955 im Mailänder Opernhaus La Scala installierte System war Vorbild für weitere Installationen zur Nachhallverlängerung in Konzertsälen, wie sie in der Folgezeit auch in der Jahrhunderthalle in Frankfurt/Höchst (1962) und in der Royal Festival Hall in London (1964) eingebaut wurden. Neben dieser kommerziellen Anwendung stellte die Firma Philips ihre Labore auch als Experimentierstätten für zeitgenössische Musik zur Verfügung. Nachdem bereits 1955 eine Demonstration des Systems im Experimentalstudio von Hermann Scherchen in Gravesano stattfand, produzierte der Komponist Henk Badings 1956 seine elektronische Ballettmusik *Kain und Abel* als Auftragswerk des Holland Festivals in den Philips Studios in Eindhoven. Es entstand ein zweikanaliges Masterband, dessen einer Kanal über Lautsprecher auf der Bühne im Haus der Künste und Wissenschaften in Den Haag wiedergegeben wurde, der zweite Kanal als diffuser Raumanteil über das Nachhallsystem. Als im folgenden Jahr Edgard Varèse für die Realisierung seiner elektronischen Komposition für das *Poème électronique* nach Eindhoven kam, stand das gleiche System zur Verfügung, erweitert um eine Apparatur zur Erzeugung von stereofonen Effekten.

Bei der Wiedergabe seiner Musik im Philips-Pavillon der Brüsseler Weltausstellung 1958 nutzte Varèse die Lautsprecherinstallation von Philips, um durch die Anordnung langer Reihen von Lautsprecher „Klangrouten“ zu konstruieren, entlang derer Klänge über die Wände des Pavillons bewegt werden konnten. Das achtminütige, auf einem dreispurigen Band produzierte Werk wurde von über 350 Lautsprechern wiedergegeben, die Klangrouten waren durch ein 15-spuriges Magnetband mit Kontrollsignalen zur Steuerung von Telefonrelaischaltungen fixiert. Da weder der Pavillon noch das Wiedergabesystem zum Zeitpunkt der Komposition vorhanden waren, kann das *Poème électronique* als geschichtetes Werk angesehen werden: Als Raumkomposition, aufgesetzt auf eine musikalische Komposition. Auch

wenn Varèse auf die räumliche Wiedergabe während der Vorbereitung der Installation nur noch wenig Einfluss nahm, finden wir in dieser Interpretation auch eine in den Äußerungen des Komponisten allgegenwärtige Doppelbedeutung des Raumbegriffs wieder: Ein innerer, abstrakter Raum, definiert durch strukturelle Parameter wie Tonhöhe und Dynamik, und ein äußerer Raum, in dem sich der Klang für den Hörer entfaltet.

Ein entscheidender Schritt in Richtung einer konsistenten Synthese direktionaler und zeitlicher Merkmale räumlicher Signaturen gelang mit den frühen Programmen zur digitalen Raumklangsteuerung in der Computermusik. Chownings klassischer Algorithmus zur Spatialisierung von *Turenas* (1972) nutzte eine quadrofone Lautsprecherkonfiguration, um Klangquellen durch stereofone Verteilung der Signalintensitäten zwischen je zwei Lautsprechern zu positionieren. Zusätzlich wurde dem Klang ein dem gewünschten Entfernungseindruck entsprechender Nachhallanteil zugesetzt und für bewegte Quellen eine durch den Dopplereffekt bedingte Tonhöhenverschiebung berechnet. Die Intention einer *Simulation* ist angesichts der räumlichen Plastizität der den Hörer umkreisenden, synthetischen Klangobjekte bei *Turenas* nicht nur unüberhörbar. Sie findet ihren Niederschlag auch im Titel des Werks, einem Anagramm auf das Wort *Natures*. Er steht für die Anwendung von Kenntnissen über das Verhalten natürlicher Schallquellen in einem kompositorischen Kontext.

Ein ähnliches Konzept für eine konsistente Raumsimulation verfolgt die Mitte der 90er Jahre am IRCAM in Paris entwickelte, unter der grafischen Signalverarbeitungsoberfläche Max verfügbare Programmbibliothek *Spatialisateur*. Das vom Komponisten zu bedienende control interface übersetzt Angaben über die räumlichen Eigenschaften von Klangquellen in Parameter einer Raumklangsteuerung und eines Nachhallalgorithmus. Im Gegensatz zu John Chownings System aus den frühen 1970er Jahren wird die Steuerung nicht über die grafische Eingabe geometrischer Pfade, sondern durch einen Satz von subjektiven, perceptiven Begriffen zum Raumeindruck (wie Präsenz, Halligkeit, räumliche Umhüllung) vorgenommen, in Echtzeit berechnet und auf verschiedenen Wiedergabeformaten ausgegeben, von mehrkanaligen Lautsprecherkonfigurationen bis hin zu einer binauralen Simulation über Kopfhörer. Damit sind im *Spatialisateur* bereits Module einer Raumsimulation im engeren Sinne integriert.¹³

Virtuelle Akustik I: Wellenfeldsynthese

Im Gegensatz zu Systemen der Raumklangsteuerung, die häufig explizit für die Aufführung von Elektroakustischer Musik konzipiert und installiert wurden, kommt ein neues Verfahren der Schallfeldreproduktion aus der akustischen Forschung. *Wellenfeldsynthese (WFS)* bietet eine Lösung für ein Problem jeder traditionellen Lautsprecherwiedergabe, nämlich die fehlende Kongruenz von semantischer und physikalischer Struktur der wiedergegebenen Klangobjekte. Wir verstehen den Klang eines Wassertropfens, aber wir hören das Schallfeld eines Lautsprechers. Somit ist auch der Ort, an dem wir das Klangobjekt lokalisieren, stets an den des Lautsprechers gebunden. Die Stereophonie bietet für diese Einschränkung nur eine punktuelle Lösung an. Zwar kann durch ein auf zwei Lautsprecher verteiltes, stereofones Signal eine Phantomschallquelle gebildet werden, die für den Hörer an einem beliebigen Punkt zwischen den Lautsprechern erscheint. Dieser Effekt ist jedoch nur dann kontrollierbar, wenn sich der Hörer bei der Wiedergabe an einem definierten Abhörpunkt befindet. Verlässt er den *sweet spot* zwischen den Lautsprechern, so springt die virtuelle Schallquelle zum Ort des Lautsprechers, dem er sich nähert. Dieses Problem besteht in der traditionellen Zweikanalstereophonie ebenso wie bei mehrkanaligen Systemen, wo für die Bildung von Phantomschallquellen stets nur je zwei benachbarte Lautsprecher benutzt werden. Für die klassische Studioproduktion

und die Rezeption von Tonträgern ist diese Festlegung auf einen sweet spot vertretbar. Bereits für die öffentliche Wiedergabe mehrkanalig-stereofoner Werke ist die räumliche Wirkung und die intendierte Position der Klangquelle jedoch nur für *einen* zentralen Hörerplatz vorhersagbar – ein Grund, warum Komponisten wie Gottfried Michael Koenig die Verwendung stereofoner Panoramen stets zu vermeiden suchten.¹⁴ In der Klangkunst, für einen frei beweglichen Hörer, war die stereofone Abbildung nie ein gangbarer Weg zur Positionierung von Schallquellen.

Das Ende der 80er Jahre an der Universität in Delft entwickelte, zunächst als *akustische Holographie* und später als *Wellenfeldsynthese* bezeichnete Verfahren benutzt ein geschlossenes Array von Lautsprechern, um das Schallfeld von realen oder virtuellen Quelle nachzubilden.¹⁵ Die Signale der von einem zentralen Rechner angesteuerten Lautsprecher bilden durch Superposition das Schallfeld einer Quelle nach, die in beliebiger Richtung und Entfernung zum Hörer positioniert werden kann. Die Wellenfelder von Punktquellen und von parallelen, ebenen Wellenfronten sind in der Erzeugung besonders unkompliziert, für die Darstellung von komplexen Wellenfeldern und ausgedehnten Schallquellen gibt es jedoch ebenfalls Lösungsansätze.¹⁶

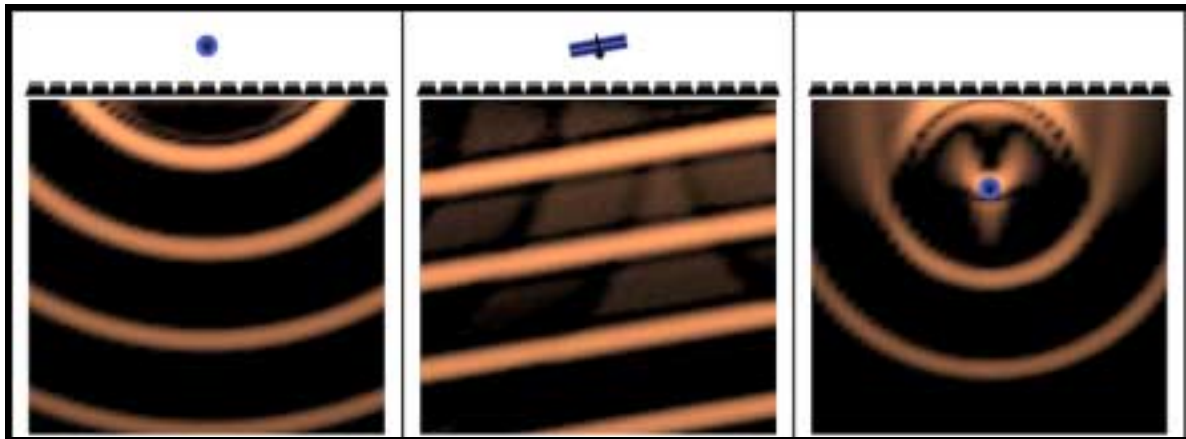


Abb. 4 Wellenfeldsynthese zur Darstellung von virtuellen Quellen durch einen Lautsprecherarray
links: Punktquelle, Mitte: Ebene Welle, rechts: Punktquelle vor dem Array

Der Richtungs- und Entfernungseindruck der Quelle ist bei Wellenfeldsynthese unabhängig von der Position des Hörers relativ zu den Lautsprechern, da die Ortsinformation nicht – wie in der Stereophonie – auf einer akustischen Illusion, sondern auf einem physikalisch korrekt synthetisiertem Schallfeld beruht. Zusätzlich zur Synthese des Direktschalls kann auch eine räumliche Signatur, d.h. ein Muster von Schallreflexionen an den Wänden eines Raums, erzeugt werden, indem jeder einzelnen Reflexion vom Zentralrechner eine eigene Schallwelle aus der jeweils zugehörigen Einfallsrichtung zugeordnet wird. In der Praxis geschieht dies nur für frühe Reflexionen hoher Intensität, wodurch jedoch eine perzeptiv ausreichend definierte Rauminformation erzeugt werden kann.

Das Verfahren der Wellenfeldsynthese hat einige physikalisch-systembedingte Grenzen: Die Synthese des Wellenfelds gelingt nur für Schallwellen unterhalb einer bestimmten Frequenz, die durch den Lautsprecherabstand bedingt ist. Sie gelingt nur unvollkommen für Hörer an den Rändern des Arrays und nicht unmittelbar vor den Lautsprechern. Um die Anzahl der für eine korrekte Schallfeldsynthese erforderlichen Quellen zu begrenzen, beschränkt man sich meist auf eine Lautsprecheranordnung in der für unsere auditive Orientierung besonders wichtigen Horizontalebene, auch wenn eine dreidimensionale Abbildung prinzipiell möglich ist. In

den vergangenen Jahren wurden von zwei kommerziellen Anbietern¹⁷ WFS-Systeme für verschiedene Anwendungen entwickelt und installiert: In industriellen und universitären Forschungszentren, im Kino und als Beschallungssystem u.a. für die Bregenzer Festspiele.

Die Wellenfeldsynthese ist seit einigen Jahren auch ein Experimentierfeld für die Klangkunst. In der Installation *A World Beyond The Loudspeakers* (1998) von Edwin van der Heyde wurden Klänge einer industriellen Umgebung von einem quadratisch angeordneten Array aus 40 Mikrofonen aufgenommen und von einem mehrkanaligen Speichermedium über eine identisch angeordnete Lautsprecherfläche wiedergegeben.

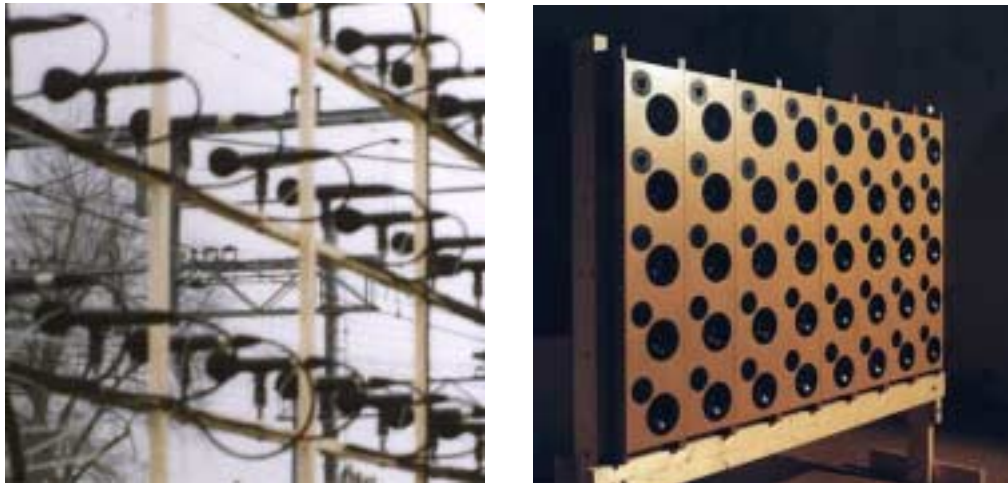


Abb. 5 Edwin van der Heyde, *A World Beyond The Loudspeakers* (1998)

Sie wirkt wie ein akustisches Fenster, durch das der Hörer blickt, und das ein physikalisch und perzeptiv plausibles Abbild der dahinterliegenden Klangwelt freigibt. Das Prinzip der Nachbildung von Wellenfronten durch eine dicht gestaffelte Lautsprecheranordnung ist bereits hier wirksam, auch wenn nicht computergenerierte, sondern aufgezeichnete Wellenfronten re-generiert werden. Auch der Begriff *Wellenfeldsynthese* wurde in diesem Zusammenhang noch nicht verwendet.

Größer ist das künstlerische Gestaltungspotential bei Arbeiten, welche die Wellenfronten virtueller Schallquellen durch digitale Signalverarbeitung synthetisieren. Beim Medienkunst-Festival Transmediale 2003 in Berlin wurden verschiedene elektronische Kompositionen über eine Software zur Komposition und zur Steuerung eines Arrays von Lautsprechern für Wellenfeldsynthese¹⁸ realisiert, überwiegend experimentelle Stücke zur Demonstration der präzisen Abbildungseigenschaften des Systems wie *Pingpong Ballet* (Marc Lingk) oder *Ballroom* (Markus Schneider). Auf dem Erlanger Hörkunsthospital im Januar 2005 wurden zwei Projekte auf einem vom Lehrstuhl für Multimediakommunikation und Signalverarbeitung der Universität Erlangen betreuten 48-kanaligen WFS-System präsentiert: Ein um die klangräumliche Dimension erweitertes Hörspiel (*Clinic – amorph fictions*, Heijko Bauer & Michael Amman) und ein abstrakter Film (*stairs*, Heijko Bauer & Alexander von Prümmer) mit ineinanderfließenden Bewegungen von Bildern und Klängen im Raum.

Bestandteil einer im Oktober 2005 in Paris eröffnete DaDa-Ausstellung des Centre Pompidou, die 2006 auch in Washington und New York zu sehen sein wird, ist ein im Umkreis von DaDa entstandenes Simultangedicht *L'amiral cherche une maison à louer* in einer Klanginstallation des Komponisten Gilles Grand. 58 Lautsprecher als WFS-Array in einem vollständig mit

weißem Tuch verkleideten Raum bilden ein akustisches Fenster auf eine unsichtbare Bühne, auf der sich drei simultan erklingende Stimmen bewegen. Ebenso wie diese Pariser Installation machte auch der Weimarer Komponist Hans Tutschku in seiner bei den 18. Tagen Neuer Musik im Oktober 2005 in Weimar über die WFS-Anlage des Fraunhofer-Instituts für Digitale Medientechnologie (IDMT) wiedergegebenen Komposition *Rituale* ausgiebigen Gebrauch von der Möglichkeit, Schallquellen als akustische Holographien vor dem Lautsprecherarray zu positionieren (s. Abb. 4 rechts) und damit Klänge dem Hörer direkt anzunähern.

Der Lautsprecher wird hier nicht nur transparent für entfernte Schallquellen, sondern tritt hinter einem unmittelbar vor dem Hörer lokalisierten Klang zurück. Im Gegensatz zu allen traditionellen Mehrkanalsystemen ist diese räumliche Wirkung nicht nur für einen privilegierten, zentralen Hörer, sondern für eine ausgedehnte Auditoriumsfläche kontrollierbar. Der technologische Aufwand (Lautsprecher, Netzwerk, Software) ist hoch, im Vergleich zu Installationen von Robin Minard wie *Silent Music* (Warschau 1995), *Still / Life* (Eindhoven 1996) oder *Soundbits* (Berlin, Inventionen 2002) mit 250 bis 750 Lautsprechern jedoch keineswegs außergewöhnlich.

Virtuelle Akustik II: Binauraltechnik

Im Gegensatz zu Verfahren, die auf eine Synthese von Schallfeldern im Raum abzielen ist die Binauraltechnik ein hörerzentrierter Ansatz, der auf einer korrekten Synthese der Ohrsignale beruht. Er nutzt die Tatsache, dass im Schalldruckverlauf vor den Trommelfellen alle Informationen enthalten sind, die uns die Wahrnehmung unserer auditiven Umgebung ermöglichen (Abb. 1). Dazu gehört nicht nur die Empfindung von Intensität und spektraler Zusammensetzung von Klang, sondern auch alle Informationen über die Lage von auditiven Objekten im Raum und die räumliche Signatur der Umgebung. Da die Trommelfelle – abgesehen von einem relativ unbedeutenden Beitrag von Köperschall und Knochenleitung – unserer einziges Tor zur auditiven Welt sind, leistet eine Synthese des Schallfeldes vor dem Trommelfell im Idealfall eine komplette Rekonstruktion unserer auditiven Umwelt. Da der akustische Fingerabdruck, den unsere Umgebung im Schallfeld vor den Trommelfellen hinterlässt, wesentlich von den Eigenschaften unseres Außenohrs und unseres Kopfes beeinflusst sind, werden binaurale Signale mit Mikrofonen im Gehörgang eines Menschen oder eines Kunstkopfsystems aufgenommen und über Kopfhörer direkt in den Gehörgang wiedergegeben. Den Nachweis der perzeptiven Glaubwürdigkeit von auf diese Weise hergestellten Hörperspektiven erbrachten bereits Anfang der 1970er Jahre die ersten Kunstkopfaufnahmen.¹⁹

Dieses Verfahren wird in seiner Urform auch in den *audio walks* der kanadischen Künstlerin Janet Cardiff verwendet. Durch die Wiedergabe von Kunstkopfaufnahmen über Kopfhörer entsteht das lebendige Abbild einer auditiven Umgebung, durch die der Hörer von einer virtuellen, häufig auch mit ihm kommunizierenden Person geführt wird. Da die klassische Kunstkopfstereofonie nicht auf die Orientierung des Rezipienten reagiert, bedingt die Festlegung auf die Hörperspektive dieser virtuellen Person eine starke Identifikation mit den Aktionen und der ausgesprochenen Gedankenwelt einer von der Komponistin häufig als Surrogat ihrer selbst angelegten Mittlerin – eine Identifikation, die durchaus zwanghaft sein kann, da der Hörer die bei der Aufnahme ausgeführten Bewegungen des Kunstkopfs nachvollziehen muss.

Die hier ästhetisch bewusst eingesetzte, fixierte Orientierung des Hörers im Schallfeld hat sich in technischer Hinsicht jedoch als Schwäche der traditionellen Kunstkopfstereofonie erwiesen. Wesentlich für die korrekte Lokalisation von Schallquellen im Schallfeld, für die

Plausibilität der Hörperspektive und die Immersion des Hörers in ihr ist die dynamische Nachführung des Ohrsignals auf die Kopforientierung des Hörers: Die auditive Welt darf sich nicht *mit dem* Hörer verändern, der Hörer muss sich *in ihr* frei bewegen können.²⁰ Dies erfordert jedoch einen Sensor für die Kopfposition des Hörers (head tracker), einen Rechner, der für jede Änderung der Kopforientierung das binaurale Signal neu berechnet und schließlich das Vorliegen der allen erlaubten Kopforientierungen entsprechenden räumlichen Signaturen in Form von binauralen Raumimpulsantworten im Speicher des Rechners. Erst wenn diese in ausreichender räumlicher Auflösung vorliegen und die Verarbeitung der zugespielten, nachhallfreien Quellsignale ausreichend verzögerungsfrei geschieht, kann der Hörer zwischen einer Schallquelle im Raum und ihrer binauralen Simulation nicht mehr unterscheiden.²¹

Ein Forschungsprojekt, das mit dynamisch nachgeführten Binauralsignalen für Klanginstallationen arbeitete, war das von 2001 bis 2003 von der EU geförderte Projekt *LISTEN – Augmenting everyday environments through interactive soundscapes*. Im Rahmen des Projekts wurde eine Software zur Komposition von virtuellen auditiven Umgebungen und zur Generierung binauraler Signale entwickelt, die über drahtlose Kopfhörer mit head tracking über eine im Kunstmuseum Bonn fest installierte Funkanlage wiedergegeben wurden. Darüberhinaus wurden Anwendungen des Systems im Rahmen einer multimedialen Installation, im Bereich des Produktmarketing und der Museumspädagogik erprobt ([ausführliche Beschreibung s. Artikel von G. Eckel in diesem Band](#)).

Neben der Schaffung von virtuellen auditiven Umgebungen, in der sich Hörer innerhalb gewisser, zur Zeit vor allem durch die Technologie des head tracking und der drahtlosen Kopfhörerwiedergabe vorgegebener Grenzen frei bewegen können, bietet die Binauraltechnik noch eine weitere, doppelte Perspektive für die Klangkunst: Die Möglichkeit, Klanginstallationen bereits vor deren Realisierung im Modell auditiv zu überprüfen und die Option, Klanginstallationen, die nur selten permanent sind, digital zu archivieren. Exemplarisch wird dies an dem im Rahmen des Kultur2000-Programms der Europäischen Union geförderten Projekts *Virtual Electronic Poem*, das im September 2005 abgeschlossen wurde. Ziel war eine visuelle und auditive Rekonstruktion des *Poème électronique*, d.h. der sensorischen Eindrücke eines Besuchers im Philips-Pavillon der Brüsseler Weltausstellung von 1958. Auch wenn die Musik von Varèse schon bald nach Ende der Ausstellung in einer stereofonen Version auf LP veröffentlicht wurde, ebenso wie die von Le Corbusier ausgewählten, an die Wände des Pavillons projizierten Bilder als Film und später als Videoband: Der Gesamteindruck von horizontal und vertikal durch den Pavillon bewegten Klängen und auf die hyperbolisch gekrümmten Wandflächen projizierten Bildern, Filmsegmenten und Farbstimmungen entzieht sich allen traditionellen Formen der Archivierung. Im Rahmen von *Virtual Electronic Poem* wurde daher in einem Computermodell die Gesamtheit der visuellen und auditiven Signaturen für einen zentralen Hörerplatz im Pavillon berechnet.

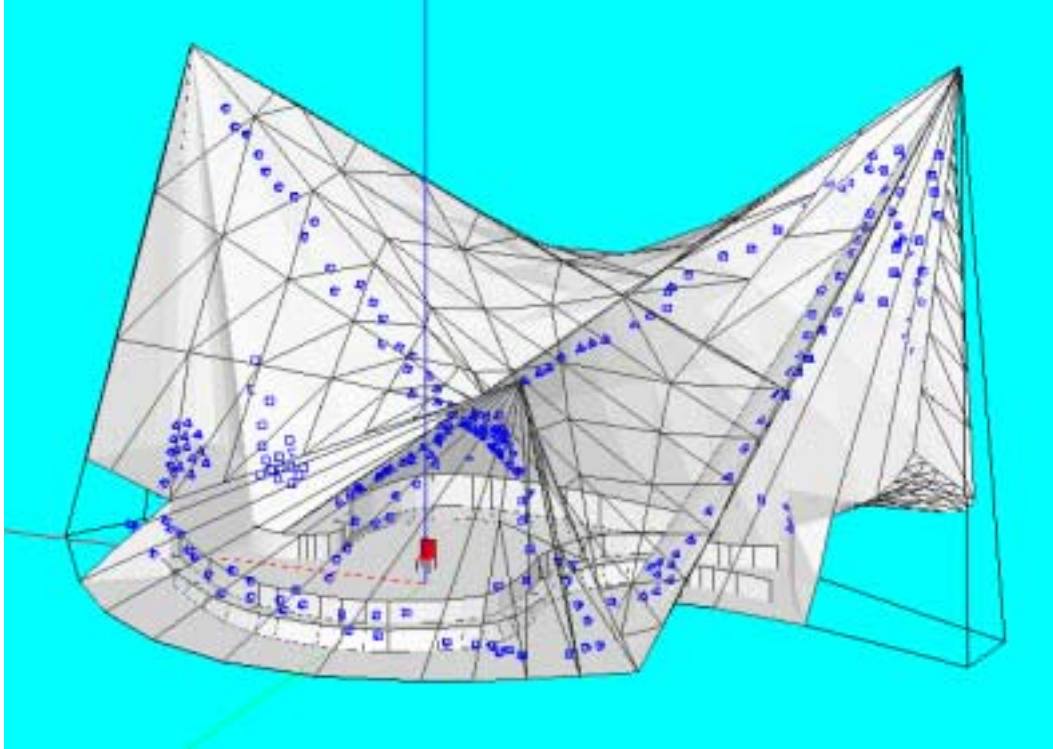


Abb. 6 Computermodell des Philips-Pavillons der Brüsseler Weltausstellung von 1958 mit Lautsprecherpositionen

Drei monofone und ein stereofones Magnetband, die als Vorlage für die im Pavillon selbst von einem perforierten Magnetfilm wiedergegebene Musik dienten, wurden im Jahr 2000 von Kees Tazelaar im Bandarchiv des Instituts für Sonologie aufgefunden. Sie bilden nun das Quellsignal für die Erzeugung eines binauralen Signals durch Verrechnung mit den im Modell berechneten Raumsignaturen und für die Wiedergabe über einen Kopfhörer mit head tracking. In Verbindung mit einer ebenfalls computermodellierten und über einen stereoskopischen Datenhelm (head mounted display) wiedergegebenen visuellen Rekonstruktion entsteht – fast 50 Jahre nach dem Abriss der Installation – ein ebenso lebendiges wie digital archivierbares Abbild eines Schlüsselwerks der Medienkunst.²² Ein Beitrag zur Sicherung des kulturellen Erbes ebenso wie eine Vorausschau auf die technologischen Werkzeuge der Zukunft.

-
- ¹ Fontana, Bill, *The Relocation of Ambient Sound*, Leonardo Volume 20/2, Pergamon Press, Oxford, 1987 und ders., *The Relocation of Ambient Sound: Urban Sound Sculpture*, <http://www.resoundings.org/Pages/Urban%20Sound%20Sculpture.html>
- ² Rettinger, M., *Reverberation Chambers for Re-Recording*, Journal of the Society of Motion Picture Engineers, 46 (1945), S. 350-357
- ³ Kuhl, Walter, *Über die akustischen und technischen Eigenschaften der Nachhallplatte*, Rundfunktechnische Mitteilungen 2 (1958), S. 111-116
- ⁴ Morawska-Büingeler, Marietta, *Schwingende Elektronen. Eine Dokumentation über das Studio für Elektronische Musik des Westdeutschen Rundfunks in Köln 1951-1986*, Köln 1988, S. 46
- ⁵ Schroeder, M.R. & Logan, B.F., 'Colorless' Artificial Reverberation, Journal of the Audio Engineering Society 9/3 (1961)
- ⁶ Chowning, John M., *The Simulation of Moving Sound Sources*, Journal of the Audio Engineering Society 19/1 (1971), reprinted in: Computer Music Journal, Juni 1977
- ⁷ Baeder, K.O. & Blesser, B.A., *Klangumformung durch Computer*, Tagungsbericht der 10. Tonmeistertagung, Köln 1975
- ⁸ Das EMT 250 arbeitete noch mit 24 kHz Abtastfrequenz, entsprechend einem Frequenzumfang von 11 kHz, und 12 bit Wortbreite. Während EMT nach dem Ankauf in den 80er Jahren in Konkurs ging, entwickelten sich die Geräte des Konkurrenten Lexicon zum Industriestandard im Tonstudiobereich. Die zunehmende Qualität der Signalübertragung und die Komplexität der implementierten Algorithmen lässt sich an (bis heute) drei Gerätegenerationen (Lexicon 224/1978, Lexicon 480/1986, Lexicon 960/2000) hörbar nachvollziehen
- ⁹ Gardner, W.G., *Efficient convolution without input-output delay*, Journal of the Audio Engineering Society 43/3 (1995)
- ¹⁰ Erste Geräte dieser Art waren die Nachhallerzeuger DRE-S777 (Sony) und SREV1 (Yamaha).
- ¹¹ Ein ursprünglich geplanter fünfter Lautsprecher über dem Publikum für *Gesang der Jünglinge* erwies sich aufgrund von Synchronisationsproblemen der zusätzlichen Bandmaschine mit dem vierkanaligen Material als nicht realisierbar. Als Reaktion auf dieses Problem fertigte Stockhausen nach der Uraufführung eine neue quadrofone Mischung an.
- ¹² Abbildung aus Philips Technisch Tijdschrift 17, Nr. 7-8 (1955), S. 224
- ¹³ Jot, Jean-Marc, *Etude et réalisation d'un spatialisateur de sons par modèles physiques et perceptifs*, Dissertation Telecom Paris, 1992 und Jot, Jean-Marc und Warusfel, Olivier, *Spat~ : A Spatial Processor for Musicians and Sound Engineers*, <http://mediatheque.ircam.fr/articles/textes/Jot95a>
- ¹⁴ Kees Tazelaar, priv. Kommunikation
- ¹⁵ Berkhout, A.J., *A Holographic approach to acoustic control*, Journal of the Audio Engineering Society 36/12 (1988) und Berkhout, A.J., de Vries, D. und Vogel, P., *Acoustic control by wave field synthesis*, Journal of the Acoustical Society of America 93/5 (1993)
- ¹⁶ Baalman, Marije, *Discretisation of complex sound sources for reproduction with Wave Field Synthesis*, Fortschritte der Akustik, DAGA München 2005
- ¹⁷ Anbieter sind die Iosono GmbH, eine Ausgründung des Fraunhofer-Instituts für Digitale Medientechnologie (IDMT) in Ilmenau und die Schweizer SonicEmotion GmbH
- ¹⁸ Baalman, M.A.J., *Application of Wave Field Synthesis in the composition of electronic music*, International Computer Music Conference, Singapur 2003; die Software WONDER wird seit 2003 von Marije Baalman am Elektronischen Studio der TU Berlin weiterentwickelt und ist open source unter GPL verfügbar unter https://sourceforge.net/project/showfiles.php?group_id=136020
- ¹⁹ Eine der ersten Kunstkopf-Produktionen war das Science-Fiction-Hörspiel *Demolition* von Alfred Bester, das auf der Funkausstellung in Berlin 1973 Aufsehen erregte.
- ²⁰ Mackensen, Philip, *Auditive Lokalisation. Kopfbewegungen als zusätzliches Lokalisationsmerkmal*, Dissertation TU Berlin 2004
- ²¹ Moldrzyk, C., Lentz, T. und Weinzierl, S., *Perzeptive Evaluation binauraler Auralisationen*, Fortschritte der Akustik, DAGA München 2005
- ²² Lombardo, V., Fitch, J., Weinzierl, S., Starosolski, R. et al., *The Virtual Electronic Poem (VEP) Project*, International Computer Music Conference (ICMC), Barcelona 2005