

3-D-Lautsprecher-Wiedergabemethoden

Jens Blauert

Institut für Kommunikationsakustik, Ruhr-Universität Bochum, D-44780 Bochum, jens.blauert@rub.de

Zusammenfassung

Verfügbare Methoden raumbezogener Lautsprecherwiedergabe werden vorgestellt und kritisch evaluiert, wobei ihr Einsatz zur Erzeugung von Scheinhörwelten im Vordergrund der Betrachtungen steht. Folgende Methoden werden vergleichend diskutiert: Intensitäts- und Laufzeitstereophonie, 5.1 Surround, Schallfeldsynthese mittels Kugelflächenfunktionen (*Ambisonics*), Schallfeldsynthese nach der Hüllflächenmethode (*WFS*), Binaurale Merkmalauswahl (*DirAC*). Eine englische Langfassung dieses Vortrags ist zugänglich abgelegt auf http://www2.ika.rub.de/blauert/RoomRelated_8/.

Stereophonie

Bei diesem weit verbreiteten Zweikanalverfahren wird die Hörereignisposition in Intensitätsunterschiede (sog. *Amplitude Panning*) und/oder Laufzeitunterschiede zwischen den zwei Kanälen kodiert. Das Gehör bildet die Hörereignisse aus Merkmalen des überlagerten Schallfeldes der beiden Lautsprecher (*Summenlokalisation*). Das sehr populäre und erstaunlich wirksame Verfahren ist im Wesentlichen auf 2-D-Wiedergabe beschränkt.

Pros und Cons der Stereophonie

Allgemein

- +/- Genormte Abhörsituation (restriktiv)
- Hörereignisse nur in begrenztem Frontalsektor
- Hörmerkmale geliefert von überlagertem Schallfeld
- Begrenzter Abhörbereich ("sweet spot"), außerhalb starke Hörereignisverschiebungen
- Alle Hörereignisse entstehen in Lautsprecherentfernung
- Begrenzte Möglichkeit *Ambiance* und Raumeindruck zu erzeugen
- Klangverfärbungen wegen kohärenter Lautsprechererkmale

Reine Intensitätsstereophonie

- + Einfache Mischregeln
- + Erprobte Mikrofonanordnungen
- + Mono-kompatibel

Gemischte Intensitäts- & Laufzeitstereophonie

- + Etwas erweiterter Sweet Spot
- + Weniger Klangverfärbung
- Höhere Lokalisationsunschärfe
- Unzureichende Mono-Kompatibilität
- Mischen schwierig bis unmöglich

Heimtheater 5.1 Surround

Erweiterung der Stereophonie zu einem 3-D-Verfahren hin, was folgerichtig mehr Kanäle erfordert, führte zu dem populären Heimtheaterverfahren *5.1-Surround*. Es beruht auf Amplitude-Panning zwischen fünf Übertragungskanälen. Wegen Schwierigkeiten mit der Summenlokalisation zwischen seitlichen Lautsprechern sind die hinteren zwei Lautsprecher in den Richtungen ca. 4 und 8 Uhr angeordnet. Weiterhin wurde ein sog. Dialogkanal (vorne mittig) eingeführt.

Pros und Cons von 3–2 Format (5.1 surround)

- + Weniger Hörereignisverschiebungen wegen Mittenkanal (dialog channel)

- + Sweet Spot gegenüber Stereo breiter. Räumlichkeit und *Ambiance* erfahrbar
- + Möglichkeiten für räumliche Effekte
- +/- Genormte Abhörsituation (restriktiv)
- Sweet Spot engt von Prinzip her die Abhörposition ein
- Hörereignisse vorwiegend in der Horizontalebene
- Alle Hörereignisse erscheinen grob in Lautsprecherentfernung
- Keine präzise lokalisierten Hörereignisse in seitlichen Richtungen
- Klangverfärbungen wegen überlagertem Schallfeld
- Typischer, charakteristischer Kino-Sound !!

Ambisonics

Es gibt zwei unterschiedliche Verfahrensansätze, die auf eine authentische dreidimensionale Schallfeldsynthese (sog. *Holophonie*) abzielen. Der eine, *Ambisonic*, synthetisiert das Schallfeld aus im Grenzfall unendlich vielen ebenen Schallwellen, die aus allen möglichen Richtungen in einem Bezugspunkt einfallen. Das Schallfeld im Bezugspunkt wird in eine Reihe von orthogonalen Kugelflächenfunktionen n . Ordnung entwickelt. Reale Verfahren arbeiten mit endlich vielen Kanälen (*Ambisonics* n -ter Ordnung). Für hinreichend geringe Lokalisationsunschärfe ist eine hinreichend hohe Ordnung erforderlich.

Pros und Cons von *Ambisonics* höherer Ordnung

- + Erlaubt 3-D-Hören
- + Mathematisch sauber definiert über Kugelflächenfunktionen
- + Breiter "Sweet Spot"
- + Mischen nach einfachen Regeln, da auf Amplitudensteuerung beruhend
- + Leicht an unterschiedliche Lautsprecheranordnungen anpassbar
- + Lokalisationsunschärfe nimmt mit steigender Ordnung ab
- + Sanftes Versagen bei hohen Frequenzen (Sweet Spot wird enger)
- Mikrophone für höhere Ordnung noch nicht wirklich verfügbar
- Hörereignisse erscheinen in Lautsprecherentfernung, sofern nicht spezielle Kompensationsmaßnahmen angewandt werden
- Überlagerte Schallfelder können Klangverfärbung verursachen
- Überlagerungsfehler durch Kopfschatten können Lokalisationsfehler und Klangverfärbungen zur Folge haben

Wellenfeldsynthese

Das alternative Holophonieverfahren, *Wellenfeldsynthese* (*WFS*), beruht auf dem Helmholtz-Rayleigh-Integral, auf Grund dessen das Schallfeld innerhalb einer geschlossenen Hüllfläche durch den Schalldruck- und Schallschnelleverlauf auf dieser Hüllfläche vollständig bestimmt ist. Reale Verfahren arbeiten mit einer begrenzten Kanalzahl. Wei-

terhin wird zumeist keine geschlossenen Hüllfläche, sondern z.B. nur eine Linie oder ein Kreis von Schallquellen realisiert.

Pros und Cons der Wellenfeldsynthese

- + Erlaubt 3-D-Hören
- + Mathematisch sauber definiert über die *Kirchhoff-Helmholtz* Integralgleichung
- + Kein „sweet spot“ vom Prinzip her
- + Mischen prinzipiell möglich
- + Hörereignisse an beliebigen Positionen möglich
- + Lokalisationsunschärfe nimmt mit steigender Kanalzahl ab
- Unsanftes Versagen oberhalb Grenzfrequenz wegen räumlicher Unterabtastung (aliasing)
- Geeignete Mikrophananordnungen noch nicht wirklich verfügbar
- Muss an die verwendetet spezifische Lautsprecheranordnung spezifisch angepasst werden

Die Unzulänglichkeiten der beiden Holophonie-Verfahren können durch Ausnutzung psychoakustischer Effekte zumindest teilweise kompensiert werden, z.B. kann man sich auf die Synthese wirklich hörbarer binauraler Merkmale beschränken (*Merkmalsselektionsverfahren* wie *DirAC*). Weitere Kompensationsmöglichkeiten sind im Folgenden genannt.

Schlussfolgerungen

Raumbezogenen Wiedergabemethoden zur räumlichen Präsentation auditorischer Szenen sind nunmehr verfügbar. Dies gilt insbesondere, wenn diese Szenen synthetisiert werden und somit eventuelle Probleme mit Aufnahmeverfahren gar nicht erst nicht auftreten.

- Für authentische Wiedergabe (sog. *Holophonie*) kommen vor allem die beiden folgenden Verfahren in Frage
 - *Ambisonics*, höherer Ordnung (*HOA*) und
 - Wellenfeldsynthese (*WFS*).
- Zur Zeit liegt *HOA* dabei möglicherweise etwas in Führung, zumindest hinsichtlich des hier diskutierten Anwendungsfalles. Die Begründung hierfür ist, dass *HOA* vom Prinzip her keine unerwünschten Spiegelbilder (sog. aliasing) produziert.
- Beide Methoden, *HOA* wie *WFS*, können ergänzt werden, um bestimmte Unzulänglichkeiten zu kompensieren, u.a. durch
 - Vectorbasierte Amplitudensteuerung, *VBAP*, u.a. gezielter Einsatz von Summenlokalisierung [24]
 - Merkmalsselektionsverfahren. z.B. *DirAC*
 - Nahfeldkorrektur bei *HOA*
 - Einsatz von Außenohrübertragungsfunktionen

Fazit: Wer heute Hardware für Holophonie einkaufen will, ist gut beraten, die Komponenten so auszuwählen, dass sie zur Realisation von unterschiedlichen Verfahren geeignet sind – insbesondere von *Ambisonics* und *WFS*. Dies ist prinzipiell möglich. Zirkuläre und sphärische Array bieten hier derzeit die beste Kompatibilität.

Falls dies alles nicht zum Ziel führt, können zudem Methoden der Binauraltechnik mit Lautsprecherwiedergabe erwogen werden, z.B. transaurale Systeme – und zwar sowohl mit wie auch ohne Kopffpositionsbestimmung.

Weiterführende Literatur

- [1] Blauert, J. & Braasch, J. (2008) Räumliches Hören, in: S. Weinzierl, ed.: *Handbuch der Audiotechnik*, Springer
- [2] Blauert, J. (1974) Vergleich unterschiedlicher Systeme zur originalgetreuen elektroakustischen Übertragung, *Rundfunk-techn. Mitt.* **18**, 222–227
- [3] Blumlein, A.D. (1931) Improvements in and relating to sound transmission, sound recording and sound-reproducing systems, *British Patents #325, #394*
- [4] Daniel, J., Nicol, R. & Moreau, S. ((2003) Further investigation of high-order Ambisonics and wavefield synthesis for holophonic sound imaging, Paper #5788, 114th Conv. Audio-Engr. Soc. NL-Amsterdam
- [5] Damaske (1967/68) Subjective Untersuchung von Schallfeldern, *Acustica* **19**, 199–213
- [6] Faller, F. (2004) Parametric coding of spatial audio, *doct. diss.* 3062, EPFL, CH–Lausanne
- [7] Gaik, W. (1990) Untersuchungen zur binauralen Verarbeitung kopfbezogener Signale, *doct. diss.*, Ruhr-Universität Bochum,
- [8] Gerzon, M. (1973) Periphony: with-height sound reproduction, *J. Audio-Engr. Soc.* **21**, 2–10
- [9] Gumerov, N. & Duraismami, R. (2004) The FMM for 3-D Helmholtz equation, <http://www.cscamm.umd.edu/tutorials> (letzter Zugriff Juni 2007)
- [10] Hollerweger, F. (2005) An introduction to higher-order Ambisonics, http://create.ucsb.edu/wp/FH_HOA.pdf (letzter Zugriff Juni 2007)
- [11] Hawksford, M. (2007) Surround sound and high resolution audio, lecture at the Ionian Univ., GR-Corfu
- [12] Lindemann, W. (1985) Die Erweiterung des Kreuzkorrelationsmodells der binauralen Signalverarbeitung durch kontralaterale Inhibitionsmechanismen *doct. diss.*, Ruhr-Universität Bochum
- [13] Merimaa, J. (2006), Analysis, synthesis & perception of spatial sound – binaural localization modelling and multi-channel loudspeaker reproduction, *doct. diss.*, TKK, FI–Helsinki
- [14] Merimaa, J. & Pulkki, V. (2005) Spatial impulse response rendering I: analysis and synthesis, *J. Audio-Engr. Soc.* **53**, 1115–1127
- [15] Meyer, E. & Thiele, R. (1956) Raumakustische Untersuchungen in zahlreichen Konzertsälen und Rundfunkstudios unter Anwendung neuerer Messverfahren *Acustica* **6**, 425–444
- [16] Moreau, S., Daniel, J. & Bertet, S. (2006) 3-D sound field recording with higher-order Ambisonics – objective measurements and validation of spherical microphones, Paper #6857, 120th Conv. Audio-Engr. Soc. NL–Amsterdam
- [17] Plenge, G. & Theile, G. (1977) Localization of lateral phantom sources, *J. Audio-Engr. Soc.* **25**, 196–200
- [18] Pulkki, V. (2006) Directional audio coding in spatial sound reproduction and stereo upmixing, 28th Int. Conf. Audio-Engr. Soc., Piteå, SV–Sweden
- [19] Pulkki, V. (2001), Spatial sound generation and perception by amplitude panning techniques, *doct. diss.*, TKK, FI–Helsinki
- [20] Steinberg, J.C. & Snow, W.B. (1934) Auditory perspective – physical factors, *Electr. Engr.* 12–17
- [21] Theile, G. (2005) Räumliche Tondarstellung mit Wellenfeldsynthese, *VDT-Magazin* **2**
- [22] Wagener (1971) Räumliche Verteilung von Hörrichtungen in synthetischen Schallfeldern, *Acustica* **25**, 203–218
- [23] Wendt, K. (1963), Das Richtungshören bei der Überlagerung zweier Schallfelder bei Intensitäts- und Laufzeitstereophonie *doct. diss.*, RWTH, D–Aachen
- [24] Wittek, H., Rumsey, F. & Theile, G. (2007) Perceptual enhancement of wave-field synthesis by stereophonic means: das *OPSI*-Verfahren (personal communication)
- [25] Poletti, M. (1998) The analysis of general assisted reverberation systems, *Acustica* **84** 1077–1082
- [26] Rumsey, F. (2001) *Spatial audio*, Focal Press, GB-Oxford