

Berechnung und Darstellung von Schallquellen im dreidimensionalen Raum mit Mikrofonarrays und Beamforming

Dirk Döbler¹, Sascha Jensen²

¹ GFaI e.V., 12489 Berlin, E-Mail: doebler@gfai.de

² GFaI e.V., 12489 Berlin, E-Mail: jensen@gfai.de

Einleitung

Die frequenz- und ortsselektive Darstellung von Schallquellen als Ergebnis von Messungen mit Mikrofonarrays oder dem Scan mit Intensitätssonden ist mittlerweile Stand der Technik. Dabei werden die identifizierten Schallquellen meist als farb- oder grauwertcodierte Karte dargestellt, die entweder mit einem Foto oder einem 3D-Modell des Messobjektes kombiniert wird. Für aeroakustische Schallquellen sind diese Verfahren nur bedingt geeignet. Die räumliche Lage dieser Quellen kann im Vorfeld nicht eingegrenzt werden, da die Entstehungsorte nicht auf einer Oberfläche liegen. Hier ist ein kompletter akustischer 3D-Scan aller möglichen Entstehungsorte notwendig (Volumenkartierung). Eine weitere Herausforderung ist die Darstellung dieser Schallquellen. Ein einfaches Mapping auf eine Oberfläche ist nicht möglich, die Quellen müssen dreidimensional im Raum visualisiert werden.

Im Beitrag werden die Ergebnisse von akustischen Volumenkartierungen einiger typischer Messobjekte mit unterschiedlichen Beamforming - Methoden (z.B. Standard Beamforming [1], CLEAN-SC [2], Functional Beamforming [3]) und verschiedenen 3D - Visualisierungsmethoden (Sphären, Isobaren, Voxeldarstellung) gezeigt. Es wird vergleichend auf anwendungsspezifische Vor- und Nachteile einzelner Methoden sowohl unter dem Aspekt der möglichst anschaulichen Interpretierbarkeit der Resultate für den Anwender als auch ihres rechentechnischen Aufwandes im Zusammenhang mit dem 3D - Beamforming im Volumen eingegangen.

Beamforming für dreidimensional verteilte Quellen

In den Abbildungen 1 und 2 sind Simulationen mit 9 im Raum positionierten Punktschallquellen (Rauschen, 4 kHz Terz, gleicher Pegel, Abstand 0,5 m bis 0,9 m) und deren Standard-Beamforming - Ergebnisse mit zwei verschiedenen Mikrofonarrays als 2D - Map dargestellt. Die 2D - Map liegt dabei im gleichen Abstand wie die dichteste Quelle (0,5m). In der Kartierung mit dem Spiralarray ist der deutliche Pegelabfall für die weiter hinten liegenden Quellen zu sehen, der wesentlich größer ist als es der Entfernung der Quelle zum Array entspricht. Dieser stärkere Pegelabfall entsteht durch den falschen Abstand der Kartierungsebene für die hinteren Quellen (falscher Focus, [6]). Beim Ringarray entspricht der Pegelabfall der Quellen nahezu den

Entfernungen zum Mikrofonarray. Ringarrays zeichnen sich generell durch eine hohe (in Analogie zur optischen

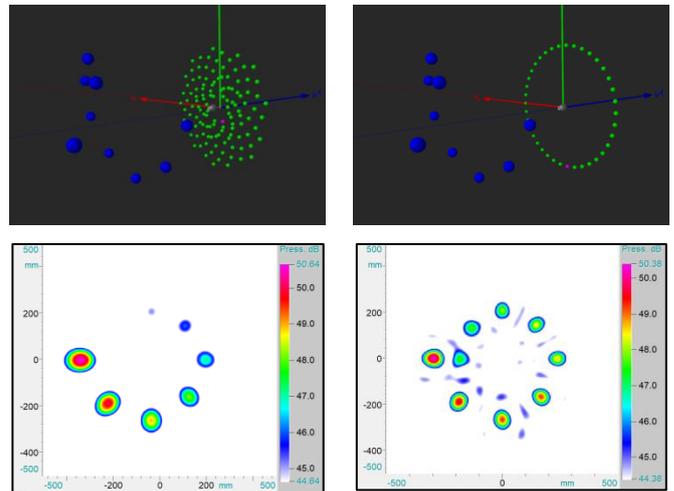


Abbildung 1: Simulation Spiralarray mit 9 Punktschallquellen und 2D - Kartierung

Abbildung 2: Simulation Ringarray mit 9 Punktschallquellen und 2D - Kartierung

Fotografie) Tiefenschärfe aus, da die Laufzeitdifferenzen als Grundlage des Beamformings nur wenig abhängig von der Quellentfernung sind. Bei genau auf der Z - Achse gelegenen Quellen kommen die Schallsignale unabhängig von der Entfernung zum Array immer gleichzeitig an, so dass hier die Tiefenschärfe sogar unendlich wird. Ringarrays eignen sich daher relativ gut für 2D - Kartierungen dreidimensional verteilter Schallquellen.

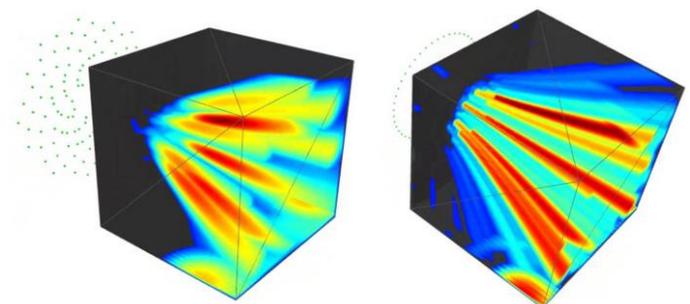


Abbildung 3: Spiralarray mit 9 Quellen und 3D-Kartierung

Abbildung 4: Ringarray mit 9 Quellen und 3D-Kartierung

Zur 3D-Kartierung im frei wählbaren Volumen wird dieses im einfachsten Fall homogen in Würfel (sog. Voxel) unterteilt [5]. Das Beamforming wird dann analog zum 2D - Mapping für den Schwerpunkt eines jeden Voxels durchgeführt und jedem Voxel der entsprechende Schallpegel zugewiesen. Mit entsprechenden Renderern und Zuweisung eines Schwellwertes zur Erzeugung transparenter Bereiche kann der (gerechnete) Schalldruckpegel wie in den Abbildungen 3 und 4 dargestellt werden. Beim Spiralarray sind gut ausgeprägte Maxima zu erkennen, welche gut mit den Quellpositionen übereinstimmen (Abweichung max. 1 cm), während sich beim Ringarray Maxima in der Tiefe kaum finden lassen. Analog zur Hauptkeulentiefe in der 2D - Kartierung kann hier die Hauptkeulentiefe eingeführt werden. Weiterhin ist gut zu erkennen, dass sich die x-y-Positionen der Quellen verschieben, wenn eine 2D - Kartierung mit falschem Abstand der Kartierungsebene durchgeführt wird. Das gilt auch für das Ringarray [4].

CLEAN-SC und Functional Beamforming im 3D-Raum

Als Beispiel für erweiterte Beamforming - Verfahren im 3D-Raum wurden Functional-Beamforming (FBF) und CLEAN-SC ausgewählt. FBF führt beim Spiralarray im Gegensatz zum Ringarray auch in der Tiefe zu einer Quellschärfung, CLEAN-SC kann die Quellpositionen von 8 Quellen im Raum korrekt finden, die neunte Quelle wird allerdings nicht kartiert. Beim Ringarray ist dies infolge nicht lokalisierbarer Maxima gar nicht möglich. Die Kombination quellschärfender Algorithmen mit wenig tiefenscharfem Array führt beim 2D - Mapping dreidimensional verteilter

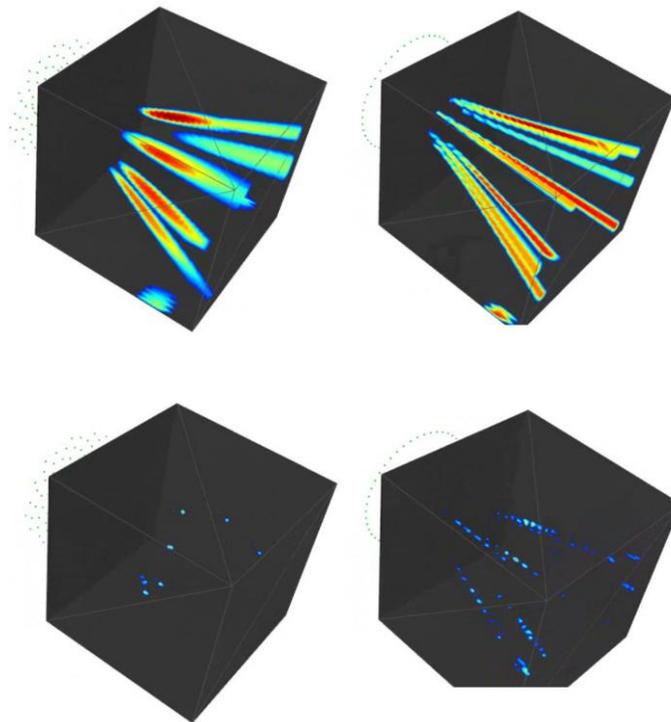


Abbildung 5: Spiralarray und Functional Beamforming (oben) und CLEAN-SC (unten)

Abbildung 6: Ringarray und Functional Beamforming (oben) und CLEAN-SC (unten)

Quellen zu falschen Pegeln bis hin zum Verschwinden von Quellen.

Effizienzsteigerung durch Einsatz von Octrees

Eine weitere Herausforderung beim Rechnen im 3D-Raum ist in der Praxis die enorme Steigerung der Anzahl der zu berechnenden Punkte. Bei nicht iterativen Verfahren steigt diese proportional zur Anzahl der zu berechnenden Punkte und Frequenzen. So sind bei einer 2D - Karte mit der Auflösung von 200x200 Punkten und 2048 Frequenzstützstellen ca. 82 Mio. Werte auszurechnen, im 3D-Raum bei gleicher Auflösung schon ca. 16 Mrd. Werte. Hier können vorteilhaft die aus dem 3D-Rendering bekannten Octrees eingesetzt werden [5]. Dazu wird der Raum mehrfach in Würfel jeweils halber Kantenlänge unterteilt (Abbildung 7).

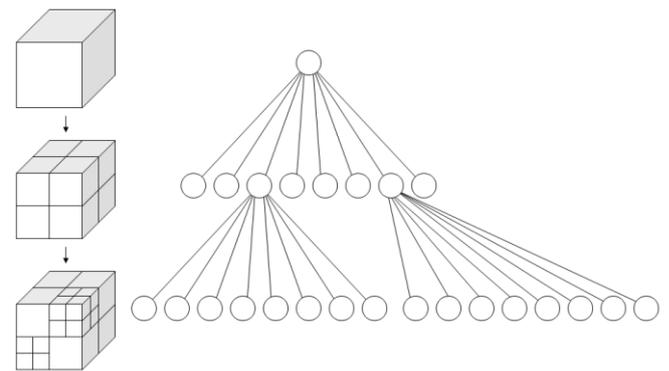


Abbildung 7: Unterteilung des Raumes mit Octree, Autor: Nü, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license

Nun kann mit einer frequenzadaptiven Auflösung gerechnet werden. Für die tiefen Frequenzen werden die größeren Auflösungsstufen verwendet, für höhere Frequenzen die feinere Aufteilung. Auf diese Weise lässt sich die Rechenzeit um bis zu Faktor 15 verkürzen. In der Tabelle (Abbildung 8) wurde als maximale Auflösung des Beamformers die halbe Wellenlänge der jeweiligen Frequenz angenommen. Dementsprechend wurde der Octree so gestaltet, dass die Kantenlängen der sich ergebenden Voxel in der Nähe der zu erwartenden Auflösung liegen. Nur für die höchste Frequenz muss mit voller Auflösung gerechnet werden, während mit der Standardmethode alle Frequenzen mit voller Auflösung in die Rechnung eingehen. Mit der Standardmethode wären in diesem Fall ca. 352 Mio. Werte zu rechnen, während mit der frequenzadaptiven Auflösung nur ca. 24 Mio. Werte anfallen.

v	Kantenlänge des OctTree				
m/s	5 m				
340					
f _{m, Terz}	lambda/2	Kantenlänge der Zelle	d	Anzahl Voxel frequenzadaptives Beamforming (2 ⁿ ·3)	Anzahl Voxel Standard-Beamforming
Hz	m	m			
100	1,700	2,500	1	8	16.777.216
125	1,360	2,500	1	8	16.777.216
160	1,063	1,250	2	64	16.777.216
200	0,850	1,250	2	64	16.777.216
250	0,680	1,250	2	64	16.777.216
315	0,540	0,625	3	512	16.777.216
400	0,425	0,625	3	512	16.777.216
500	0,340	0,625	3	512	16.777.216
630	0,270	0,313	4	4.096	16.777.216
800	0,213	0,313	4	4.096	16.777.216
1000	0,170	0,313	4	4.096	16.777.216
1250	0,136	0,156	5	32.768	16.777.216
1600	0,106	0,156	5	32.768	16.777.216
2000	0,085	0,156	5	32.768	16.777.216
2500	0,068	0,078	6	262.144	16.777.216
3150	0,054	0,078	6	262.144	16.777.216
4000	0,043	0,078	6	262.144	16.777.216
5000	0,034	0,039	7	2.097.152	16.777.216
6300	0,027	0,039	7	2.097.152	16.777.216
8000	0,021	0,039	7	2.097.152	16.777.216
10000	0,017	0,020	8	16.777.216	16.777.216
				23.967.440	352.321.536

Abbildung 8: Gegenüberstellung und Summe der zu berechnenden Voxel bei frequenzadaptiver Auflösung und Standardmethode

Voxelization von Dreiecksnetzen

Häufig liegt das 3D - Modell in hoher, aber nicht homogener Auflösung vor, um strukturelle Details gut abzubilden (0,1 – 10 Mio. Dreiecke). Für die Berechnung der akustischen Karte ist aber eine homogene und deutlich geringere Auflösung wünschenswert. Eine Reduktion der Anzahl der Dreiecke durch Zusammenführen und Vereinfachen führt oft zu einem Strukturverlust des 3D - Modells. Octrees lassen sich auch hier vorteilhaft zur Effizienzsteigerung bei der Berechnung von akustischen Karten auf 3D - Modellen einsetzen. Dazu wird das 3D - Modell von einer Bounding-Box eingefasst, welche nach dem in Abbildung 7 gezeigten Schema bis zur gewünschten Auflösungsstufe in Voxel unterteilt wird. Anschließend wird geprüft, welche Voxel Dreiecke des 3D - Modells enthalten. Nur für diese Voxel wird für den Schwerpunkt ein akustischer Pegel berechnet, der anschließend allen in diesem Voxel befindlichen Dreiecken zugewiesen wird. Auf diese Weise kann die akustische Auflösung unabhängig von der geometrischen Auflösung gewählt werden. Ein Beispiel ist in den Abbildungen 9 – 14 zu sehen. Das 3D - Modell eines Staubsaugers mit Tisch enthält bereits 238000 Dreiecke mit einer durchschnittlichen Kantenlänge von 2 mm, für die zu erwartenden Auflösung des Beamformings also deutlich zu klein. Werden aber trotzdem für alle diese Dreiecke Pegel gerechnet, ergibt sich das in Abbildung 10 gezeigte Ergebnis. Für die betrachtete 4kHz - Terz ist die Voxelauflösung in Abb.11, 12 und 13 zu grob. Bei gerechneten 94446 Voxel aber (Abbildung 14) ist der Informationsgehalt der akustischen Karte nahezu identisch mit der in Abb. 10

gezeigten Rechnung mit voller Dreiecksauflösung, wobei die Rechenzeit nur 40% beträgt. Zusätzlich kann hier natürlich noch mit frequenzadaptiver Auflösung gearbeitet werden.



Abbildung 9: 3D-Modell mit 238000 Dreiecken

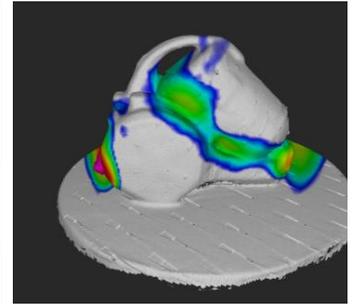


Abbildung 10: Beamforming 4kHz Terz, alle Dreiecke gerechnet

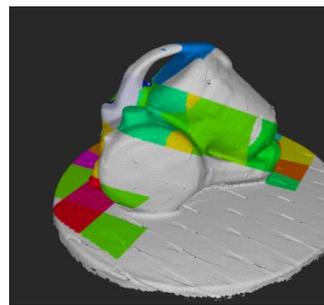


Abbildung 11: 90 Voxel

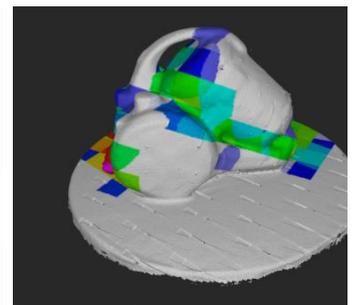


Abbildung 12: 384 Voxel

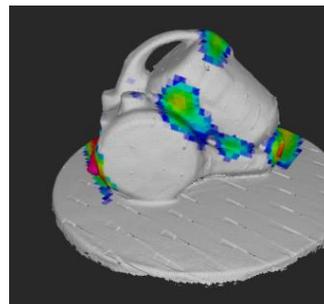


Abbildung 13: 11437 Voxel

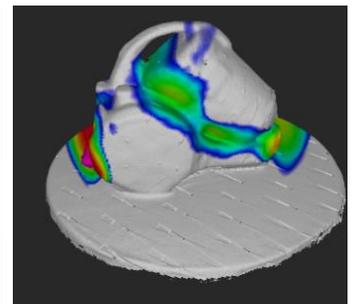


Abbildung 14: 94446 Voxel

Kombiniertes Verfahren

Manchmal, wie im Fall des gezeigten Staubsaugers, sind sowohl akustische Quellen auf dem Gehäuse als auch aeroakustische Quellen außerhalb des Objektes vorhanden, die nicht direkt auf dem Objekt liegen. Zu sehen ist das in Abbildung 10. Sowohl an der Ansaugdüse als auch am Luftauslass sind Quellen zu erkennen, die sich aber überwiegend auf dem Tisch abzeichnen. Hier ist zu vermuten, dass die eigentlichen Quellen Strömungsgeräusche sind und sich nicht auf der Oberfläche des Objektes befinden. Lediglich die Projektionen sind zu sehen. Damit dürften sowohl Pegel als auch Ort der beiden Quellen falsch sein. Hier sind kombinierte Verfahren notwendig. Dabei wird Beamforming sowohl für Dreiecke auf der Oberfläche als auch für Voxel im umgebenden Raum durchgeführt. In Abbildung 15 wurde dieses Verfahren mit Functional Beamforming angewendet. Hier ist zu sehen, dass die

aeroakustischen Quellen außerhalb des Objektes liegen und deutlich dominanter sind als in Abbildung 14 gezeigt.

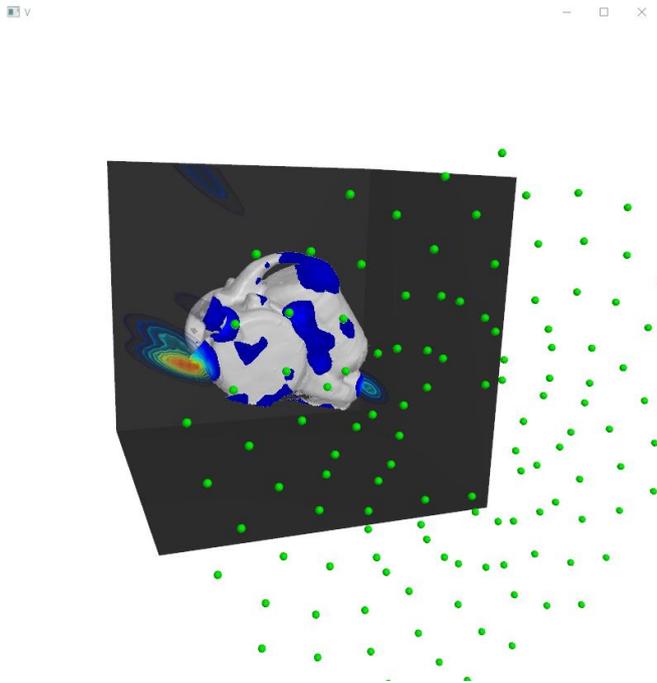


Abbildung 15: Staubsauger mit kombinierter Quelldarstellung

Zusammenfassung

Für Schallquellen, die sich nicht auf der Oberfläche eines Objektes befinden, kann der Raum in Voxel unterteilt und für jedes Voxel ein Pegel berechnet werden. Verschiedene Arrays haben dabei analog zur Hauptkeulenbreite auch eine unterschiedliche Hauptkeulentiefe. Die erforderlichen Rechenzeiten lassen sich durch den Einsatz von Octrees und frequenzadaptiver Auflösung reduzieren, welche sich auch vorteilhaft für 3D - Modelle zur Anpassung der akustischen Auflösung nutzen lassen, ohne dabei das 3D - Modell zu verändern. Für Objekte, welche sowohl aeroakustische als auch Oberflächenquellen enthalten, sind auch kombinierte Verfahren möglich.

Danksagung

Diese Arbeiten wurden gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter der Projektregistriernummer VF150034.

Literatur

- [1] D.H.Johnson, D.E Dudgeon : Array Signal Processing. Concepts and Techniques, PTR Prentice Hall 1993
- [2] P. Sijtsma: CLEAN based on spatial source coherence. International Journal of Aeroacoustics (2007), S. 357–374

- [3] Robert P. Dougherty: Functional Beamforming, BeBeC 2014
- [4] Ennes Sarradj: Tree-Dimensional acoustic source mapping, BeBeC 2012
- [5] D. Ayala, P. Brunet, R. Juan, I. Navazo: Object representation by means of nonminimal division quadrees and octrees, ACM Transactions on Graphics 4, January 1985, 41-59
- [6] Dirk Döbler, Gunnar Heilmann, Ralf Schröder: Investigation of the depth of field in acoustic maps and its relation between focal distance and array design, Internoise 2008, Shanghai