

# Bestimmung von Lautsprecherpositionen und Raumgeometrien mithilfe der Spatial Decomposition Method

Toningenieur-Projekt

Bernhard Zeller

Betreuung: Dr. Matthias Frank

Graz, 13. Juni 2018



institut für elektronische musik und akustik



## **Zusammenfassung**

Mit der "Spatial Decomposition Method" lassen sich die Richtungen eintreffender Schallwellen auf ein B-Format-Mikrofon für jedes Sample berechnen. Dazu ist aber eine geeignete Filterung der Signale nötig. Die Genauigkeit dieses Algorithmus soll geprüft werden, um herauszufinden, ob dieses Verfahren eine Alternative zu Raummikrofonen höherer Ordnung darstellt. In dieser Arbeit konnten gute Wertebereiche für Grenzfrequenzen, Glättung und Filterordnung gefunden werden. Mit diesen wurden über den von Lautsprechern erzeugten Direktschall und Wandreflexionen Raumgeometrien abgeschätzt.

## **Abstract**

The directions of arriving soundwaves at a b-format microphone can be calculated for each sample by means of the spatial decomposition method. Therefore, a fitting filtering of the signals is needed. The precision of this algorithm has to be determined in order to figure out if this method can be used as an alternative to high order sound field microphones. Good ranges of values for cutoff frequencies, smoothing and filter order were found during this work. By applying these values, the room dimensions could be determined through the reflections of loudspeaker signals on walls, the floor and the ceiling.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>5</b>
2.1	Spatial Decomposition Method (SDM) . . . . .	5
2.2	Das Soundfield ST450 . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Ortung von Lautsprechern über die Raumimpulsantwort</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Parameterstudie zu Filteroptimierung</b>	<b>13</b>
4.1	Einfluss der Filterordnung . . . . .	14
4.2	Einfluss der Glättung . . . . .	16
4.3	Einfluss der Filterbandbreite . . . . .	17
4.4	Einfluss des Frequenzbereichs . . . . .	19
4.5	Anwendung der Parameter . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Berechnung der Raumgeometrien über die ersten Reflexionen</b>	<b>23</b>
5.1	Berechnung der Raumhöhe . . . . .	23
5.2	Berechnung der Raumbreite und Raumtiefe . . . . .	24
5.3	Vergleich der Ergebnisse für den Cube . . . . .	25
<b>6</b>	<b>Anwendung der Berechnungsmethode auf einen anderen Raum</b>	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>Rückschlüsse und Ausblick</b>	<b>26</b>

# 1 Einleitung

Räumliche Aufnahme- und Wiedergabeverfahren wie Ambisonics haben das Ziel, ein konkretes Schallfeld bzw. eine spezielle Schallsituation wiederzugeben. Dafür werden Mikrofone mit unterschiedlicher Richtcharakteristik für die Aufnahme und wenigstens vier Lautsprecher für die Wiedergabe verwendet. Dabei wird für Ambisonics die Genauigkeit, mit der ein Schallfeld reproduziert werden kann durch die Systemordnung beschrieben. [1] Um ein System erster Ordnung zu erreichen genügt ein vierkanaliges Mikrofon wie zum Beispiel das Soundfield SPS200. Dieses besitzt die nötige Richtcharakteristik, um ein dreidimensionales Schallfeld aufzunehmen. Für höhere Ordnungen werden mehrkanalige Mikrofonarrays benötigt.

Mithilfe der "Spatial Decomposition Method" (SDM) kann jedem Sample des Zeitsignals einer Raumimpulsantwort eine Richtung zugeordnet werden. Mithilfe dieser Informationen kann wiederum aus einer einfachen Ambisonicsaufnahme erster Ordnung ein Ambisonicssignal höherer Ordnung berechnet werden. [2] So kann für die Aufnahme von Raumimpulsantworten mit verhältnismäßig einfachen Mitteln eine gute räumliche Auflösung erreicht werden.

In dieser Arbeit soll die Präzision dieser Methode anhand von Untersuchungen des Direktschalls und der ersten Reflexionen untersucht werden. In einem ersten Versuch wird die Position von Schallquellen, die in einer beliebigen/definierten Konstellation um das Mikrofon platziert wurden bestimmt. Danach wird der Algorithmus in einer Parameterstudie optimiert. In einem letzten Experiment soll schließlich gezeigt werden, ob es möglich ist, die Geometrien eines Raumes mithilfe der ersten Reflektionen an dessen Raumbegrenzungsflächen zu bestimmen.

## 2 Theorie

### 2.1 Spatial Decomposition Method (SDM)

Mit der Methode zur räumlichen Zerlegung von Signalen wird jedes Sample durch einen Richtungsvektor beschrieben. Dieser ist im Grunde der negative Intensitätsvektor, der sich mit

$$\vec{I} = p \cdot \vec{v} \quad (1)$$

aus der Multiplikation vom Schalldruck  $p$  mit dem Schnellektor  $\vec{v}$  berechnet. [2] In [3] wird der Richtungsvektor mit

$$D(n) = - \sum_{m=a_1}^{b_1} w(n+m) \vec{v}(n+m) W_2(m) \quad (2)$$

angegeben. Dabei ist der Schnellektor  $\vec{v}$  durch

$$\vec{v} = x\vec{e}_x + y\vec{e}_y + z\vec{e}_z \quad (3)$$

definiert. Die Werte  $a_1$  und  $b_1$  sind Zeitangaben und definieren die Grenzen einer Fensterfunktion  $W_2(n)$ , die ein zu sprunghaftes Verhalten des Richtungsvektors unterdrücken soll, um Artefakte bei einer Wiedergabe zu vermeiden.

## 2.2 Das Soundfield ST450

Das Soundfield ST450 (Abbildung 1) bietet die Möglichkeit der vierkanaligen "B-Format" Aufnahme. Dabei erhält man ein omnidirektionales W-Signal und drei Kanäle, deren Richtcharakteristika die Raumrichtungen des kartesischen Koordinatensystems abbilden. Nach Gleichung 3 lässt sich daraus direkt der Richtungsvektor berechnen.

In [2] wurde festgehalten, dass die Abstände zwischen den Membranen der einzelnen Schalldruckaufnehmer nicht unendlich klein sind. Deshalb wird es stets eine gewisse Latenz zwischen den einzelnen Kanälen des Mikrofons geben. Aus diesem Grund wird die Verwendung eines Glättungsfilters empfohlen, wie er bereits in Gleichung 2 vorgekommen ist empfohlen. Eine geeignete Größe der Glättungskonstante wird mit 10 Samples angegeben. Außerdem wird darauf hingewiesen, dass bei Frequenzen oberhalb von 4 kHz derselbe Effekt auftreten kann. Der Druckgradient zwischen zwei Membranen kann dann nicht mehr eindeutig bestimmt werden.



Abbildung 1: ]  
Das Soundfield ST450 ohne Gehäuse mit Blick auf die 4 Membranen

### 3 Ortung von Lautsprechern über die Raumimpulsantwort

Im reflexionsarmen Raum des Instituts für elektronische Musik und Akustik Graz wurden 24 Lautsprecher kreisförmig um das Mikrofon platziert. Nacheinander spielten diese je einen exponentiellen Sweep ab, der jeweils vom Soundfield-Mikrofon aufgenommen wurde. Mithilfe dieser Signale sollte die Position der Lautsprecher im Raum um das Mikrofon herum bestimmt werden. Auf die wirkliche Entfernung vom Mikrofon wurde aufgrund von nicht bekannten Latenzzeiten des Equipments keine Rücksicht genommen. Die aufgezeichneten Signale wurden - ebenso wie die originalen Anregesignale - mittels schneller Fourier Transformation in den Frequenzbereich transformiert. Dort konnte durch eine einfache Division der Signale die Übertragungsfunktion  $H(j\omega)$  berechnet werden. Durch die schnelle inverse Fouriertransformation der Übertragungsfunktion erhält man die Impulsantwort  $h$  im Zeitbereich. Aus der Impulsantwort wurde der Intensitätsvektor nach Formel 3 berechnet. Die Maximalwerte des Betrags des W-Kanals gaben Auskunft über das Auftreffen des Direktschalls auf die Mikrofone und so konnte für alle 24 Lautsprecher der Richtungsvektor gefunden werden.

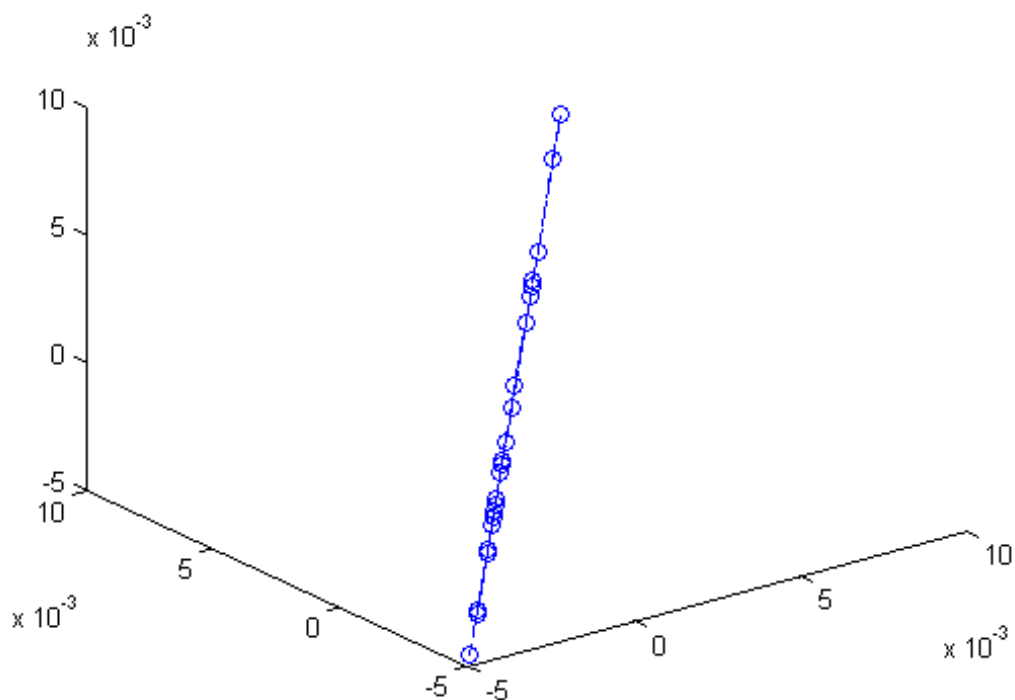


Abbildung 2: Berechnung der Lautsprecherpositionen aus dem SDM-Algorithmus. Ohne zusätzliche Filterung des Signals funktioniert die Ortung der Direktschallquellen nicht.

Wie aus Abbildung 2 ersichtlich ist, führte das obige Vorgehen zu keinen Vernünftigen Ergebnissen. Deshalb wurden die Impulsantworten vor dem SDM-Algorithmus zusätzlich mit einem Chebyshev-Filter zweiter Ordnung gefiltert. Dabei wurde die in [2] empfohlene Glättung von zehn Samples und eine obere Grenzfrequenz von 4000 Herz verwendet. Die untere Grenzfrequenz wurde mit 200 Herz festgelegt. Aufgrund des Matlab-Befehls "filtfilt" wurde das Signal gleich zweimal gefiltert, wodurch sich die Filterordnung verdoppelte.

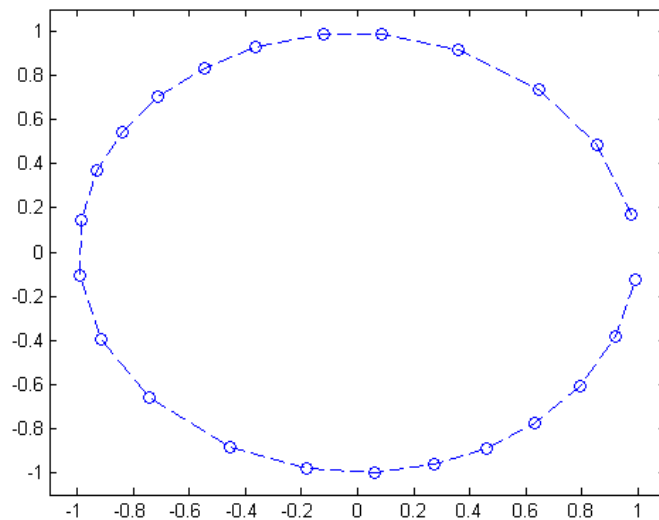


Abbildung 3: Aufritt: Lautsprecherring aus gefiltertem SDM-Signal. Die Ringförmige Anordnung ist klar zu erkennen.



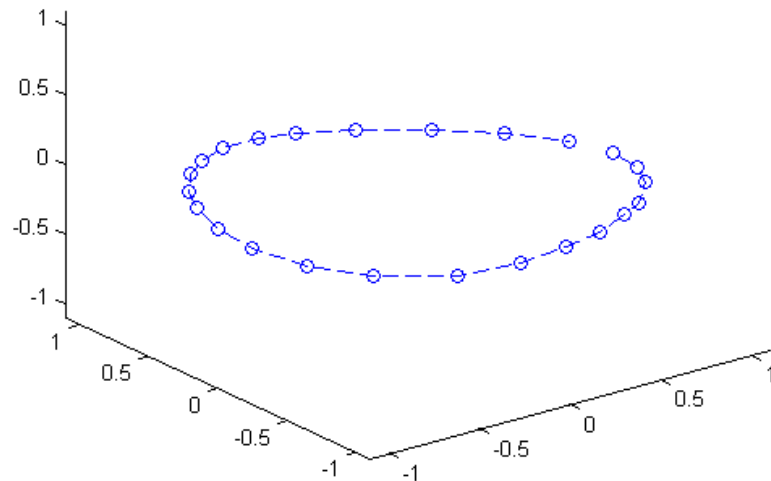


Abbildung 4: Lautsprecherring aus gefiltertem SDM-Signal. Die Ringförmige Anordnung ist klar zu erkennen.

In den Abbildungen 3 und 4 wird die kreisförmige Lautsprecheranordnung dank der Filterung ersichtlich.

Das selbe Verfahren wurde auch auf einen zweiten Raum angewendet: den "Cube". Dieser Raum beinhaltet eine dreidimensionale Anordnung von 24 Lautsprechern für die Wiedergabe von Ambisonicsaufnahmen. Außerdem besitzen die Raumbegrenzungsflächen keinen besonders hohen Absorptionsgrad. Die Abbildungen 5 und 6 zeigen die ungefilterte Anwendung des SDM-Algorithmus. Die Abbildungen 7 und 8 zeigen die Ergebnisse der Lautsprecherdetektion mit Filterung.

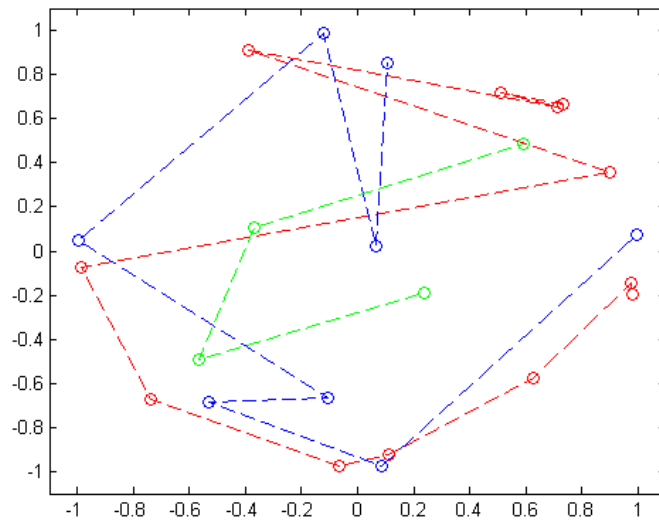


Abbildung 5: Cube ohne Filterung der Signale vor dem SDM Algorithmus. Auch hier funktioniert die Ortung der Direktschallquellen nicht.

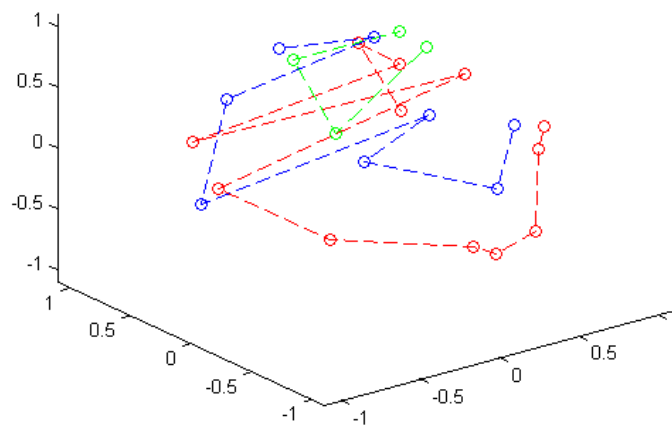


Abbildung 6: Dreidimensionale Darstellung der Lautsprecherpositionen ohne Filterung der Signale vor dem SDM Algorithmus

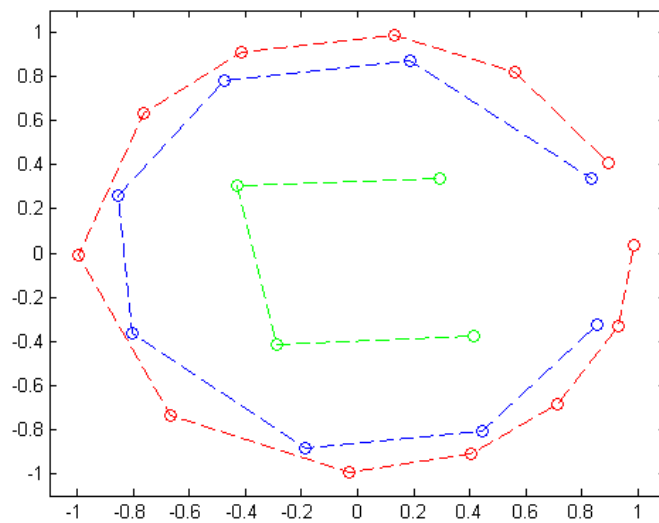


Abbildung 7: Aufriss der Lautsprecherpositionen. Durch die Filterung der Signale funktioniert das Detektieren der Schallquellen.

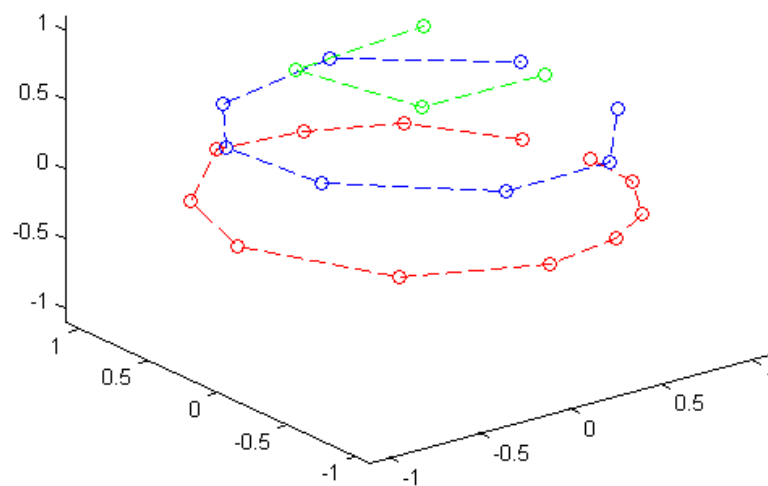


Abbildung 8: Auch im Dreidimensionalen Raum lässt sich die Position der Lautsprecher jetzt bestimmen.

Mit zusätzlicher Filterung wird das Muster für die verwendete Lautsprecheranordnung klar ersichtlich. Die tatsächlichen Entfernungen zwischen dem Mikrofon und den Lautsprechern wurde dabei aber nicht berücksichtigt - diese Längen entsprechen den Ein-

heitsvektoren.

Um die realen Längen der Vektoren richtig abzubilden muss zumindest der Abstand zwischen dem Mikrofon und einem Lautsprecher, die aktuelle Temperatur im Raum, um ihren Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit  $c$  in  $m/s$  zu berücksichtigen, und die Samplingfrequenz  $fs$  in  $Samples/s$  bekannt sein. Damit lässt sich aus diesem Signal eine zeitliche Latenz berechnen, die dann als Offset von allen Direktschallsignalen abgezogen wird um daraus die Entfernungen zwischen den Schallquellen und dem Mikrofon zu berechnen. Die Abbildungen 9 und 10 zeigen die Ergebnisse der Implementierung dieser Schritte.

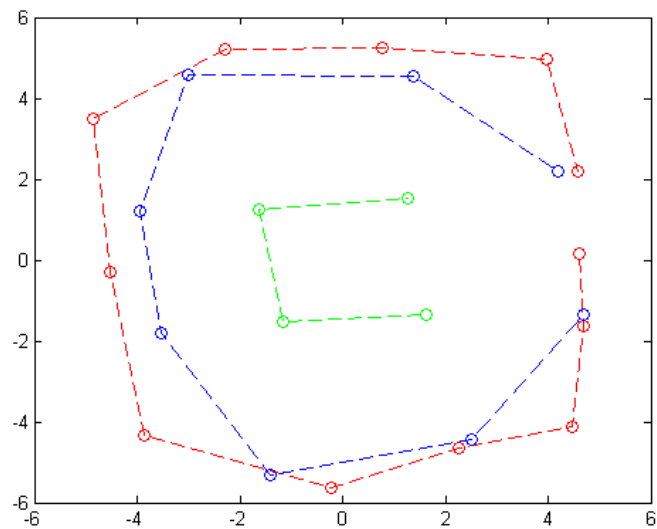


Abbildung 9: Aufriss der Lautsprecherpositionen mit korrekten Abständen zwischen Mikrofon und Lautsprechern.

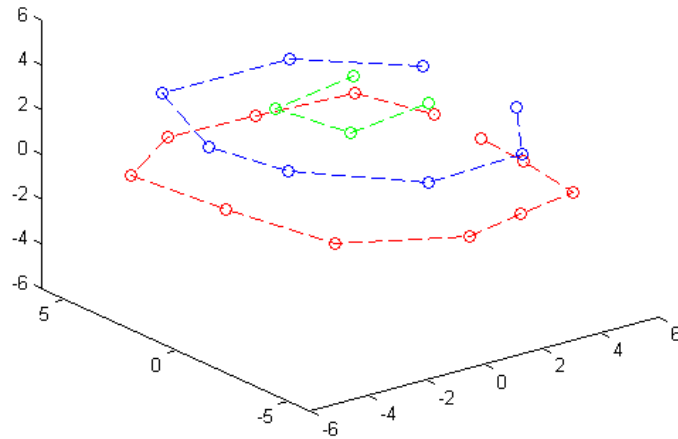


Abbildung 10: Dreidimensionale Ansicht der Schallquellenpositionen mit korrekten Abständen zwischen Mikrofon und Lautsprechern.

## 4 Parameterstudie zu Filteroptimierung

Eine Parameterstudie wurde durchgeführt. Dabei wurden die berechneten Lautsprecherpositionen des Lautsprecherrings im reflexionsarmen Raum mit einer idealen Aufstellung und die Positionen im Cube mit optisch gemessenen Werten verglichen.

Die ideale Aufstellung für den Lautsprecherring besteht darin, dass die 24 Lautsprecher mit exakt gleichen Abständen auf dem Kreis verteilt werden. D.h. der Winkel zwischen den Vektoren zweier benachbarter Lautsprecher beträgt immer 15 Grad. Der Radius spielte bei diesem versuch keine Rolle - es sollte nur die Abweichung der Winkel in der Azimutebene festgestellt werden. Dazu wurden die Lautsprecherpositionen - wie bereits gezeigt - berechnet und vom kartesischen Koordinatensystem in das Kugelkoordinatensystem transferiert. Um auszuschließen, dass das Mikrofon bei den Messungen nicht exakt ausgerichtet war, werden alle Azimutwinkel mit den idealen Winkeln verglichen, und der durchschnittliche Wert für die Abweichung von diesen abgezogen. Das Mikrofon wird also folglich virtuell in eine ideale Position gedreht. Danach wird der verbleibende Winkelfehler neu berechnet.

Um die idealen Parameter zu finden, wurden Schleifen implementiert und viele Werte getestet. Die Ergebnisse wurde schließlich in einer Ergebnistabelle festgehalten. Die Werte für die Parameter, welche die geringste Abweichung vom Idealfall hervorrufen werden in Tabelle 1 dargestellt.

Parameter	idealer Wert
Filterordnung	4
Glättung	128 Samples
Untere Grenzfrequenz 2	100 Herz
Bandbreite 2	3 Oktaven

Tabelle 1: Beste Werte für die Parameter des Lautsprecherrings. Die Bandbreite von 3 Oktaven ergibt einen obere Grenzfrequenz von 800 Herz.

Durch die Verwendung des Matlab Befehls `enquotefiltfilt` wurde das Signal zweimal verdoppelt, was insgesamt der doppelten hier angegebenen Filterordnung entspricht. Die geringste Abweichung betrug dabei durchschnittlich circa 3,1 Grad.

Ähnlich wurde bei den Lautsprecherpositionen im Cube vorgegangen. Hier wurde die Azimutachse virtuell so gedreht, dass sich das erste Lautsprechersignal genau bei Null Grad befindet. Danach wurden die Abweichungen der Lautsprecher von den optisch gemessenen Werten in der kartesischen Koordinatenebene berechnet. Der Winkel  $\phi$  zwischen zwei Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  kann mit

$$\cos\phi = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|} \quad (4)$$

berechnet werden. Danach wurde über die Abweichungen aller Lautsprecher gemittelt um einen einzelnen Wert zu erhalten. Das beste Ergebnis bzw. die besten Werte für die geringsten Winkelabweichungen werden in Tabelle 2 präsentiert.

Parameter	idealer Wert
Filterordnung	3
Glättung	ohne Glättung
Untere Grenzfrequenz 2	300 Herz
Bandbreite 2	3 Oktaven

Tabelle 2: Beste Werte für die Parameter zur Berechnung der Lautsprecherpositionen im Cube. Die Bandbreite von 3 Oktaven ergibt einen obere Grenzfrequenz von 2400 Herz.

Die Ordnung wurde durch den Matlabbefehl `“filtfilt”` wieder verdoppelt. Die durchschnittliche Abweichung von 6,3 Grad wurde ohne Glättung des Intensitätsvektors erreicht.

## 4.1 Einfluss der Filterordnung

Ausgehend von den optimierten Werten wird hier der Einfluss einzelner variierender Parameterwerte dargestellt. In diesem Fall wird untersucht, wie sich die Filterordnung auf die durchschnittliche Abweichung auswirkt. Dabei wird noch einmal angemerkt, dass aufgrund des verwendeten Matlab-Befehls `“filtfilt”` sich diese Ordnung verdoppelt.

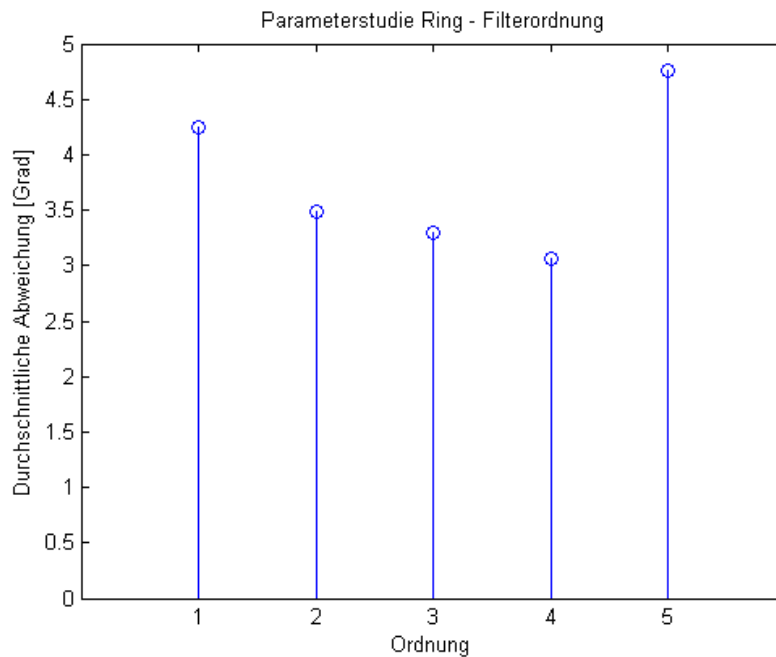


Abbildung 11: Einfluss der Filterordnung auf den Lautsprecherring. Insgesamt ist kein gravierender Unterschied zu erkennen.

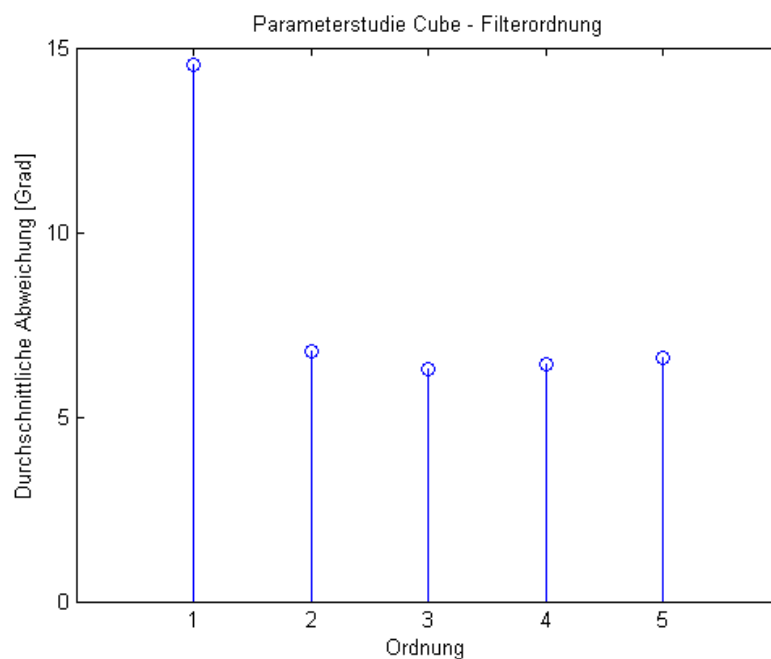


Abbildung 12: Einfluss der Filterordnung auf die Lautsprecherpositionen des Cube. Bei Filterordnung 1 ist der Fehler mehr als doppelt so groß, wie beim idealen Fall. Ansonsten ist auch hier kein gravierender Unterschied zwischen der Verwendung der restlichen Ordnungen zu erkennen.

Grundsätzlich ist die Auswahl der Filterordnung kein besonders problematischer Faktor für die Lokalisation von Direktschallquellen. Es empfiehlt sich aber zumindest einen Filter zweiter Ordnung zu verwenden, der dann zweimal durchlaufen wird.

## 4.2 Einfluss der Glättung

Der Einfluss der Glättung auf die Genauigkeit der Ortung wird in den Abbildungen 13 und 14 dargestellt. In Kapitel 2.2 wurde postuliert, dass aufgrund der Entfernung zwischen den einzelnen Membranen über mehrere Samples geglättet werden muss. Bereits bei der Auswertung der idealen Werte für die Parameter zur Berechnung der Lautsprecher des Cube fällt aber auf, dass hier die besten Ergebnisse ohne Glättung erzielt wurden.

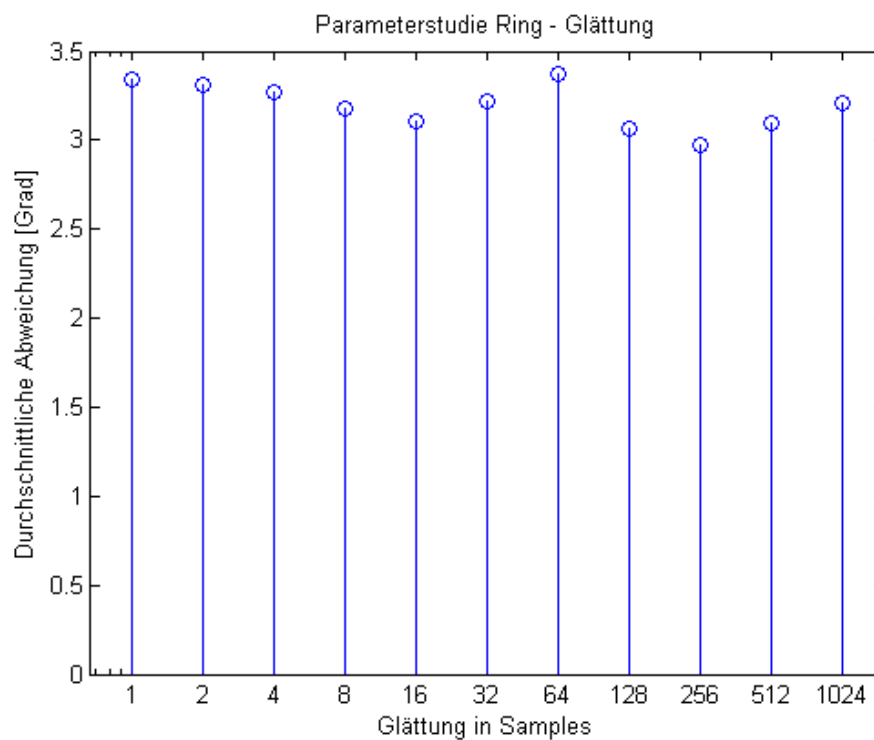


Abbildung 13: Einfluss der Glättung auf die Genauigkeit der Lokalisation der Lautsprecher im zweidimensionale Array. Entgegen den Erwartungen, hat die Glättung hier keinen Einfluss. Selbst ohne Glättung werden die Schallquellen genau geortet.



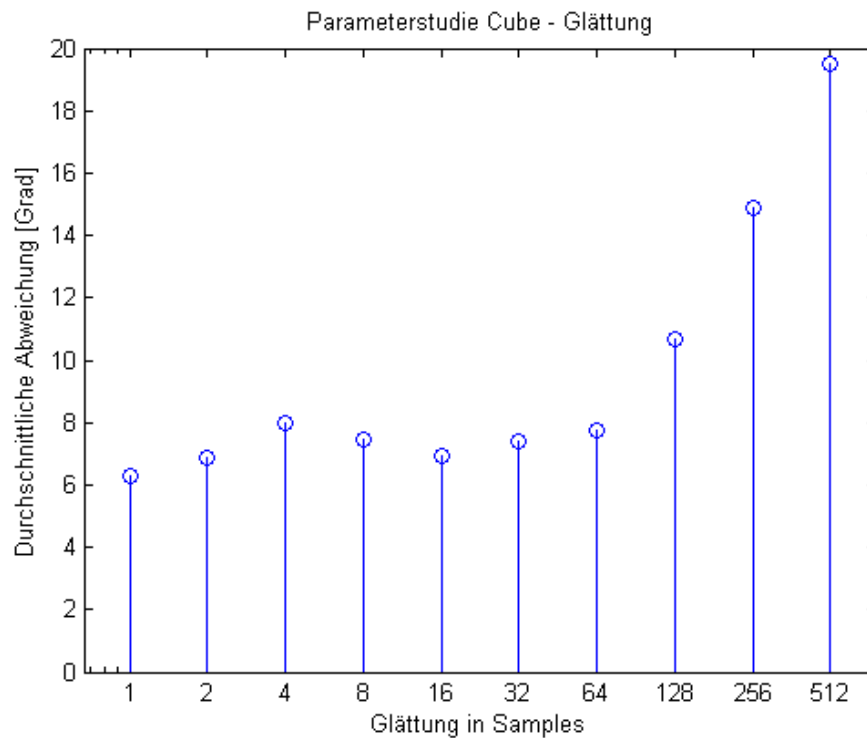


Abbildung 14: Einfluss der Glättung auf die Genauigkeit der Lokalisation der Lautsprecher im dreidimensionalen Array. Auch hier muss nicht geglättet werden um gute Ergebnisse zu erzielen. Über eine Glättung von 128 Samples sinkt die Genauigkeit der Ortung aufgrund von Reflexionen.

Es hat sich gezeigt, dass - entgegen den Erwartungen - nicht geglättet werden muss, um eine sinnvolle Lokalisation zu gewährleisten. Einen Einfluss auf die Genauigkeit dieser Methode haben nur Reflexionen, weshalb man nicht über zu viele Samples glätten sollte. 128 Samples entsprechen bei 20 Grad Celsius etwa einem Meter - in diesem Fall ein durchaus realistischer Wert für die ersten Reflexionen.

### 4.3 Einfluss der Filterbandbreite

Ausgehend von den besten Werten wurde die obere Grenzfrequenz variiert. Die Auswirkungen sind in den Abbildungen 15 und 16 dargestellt. In Kapitel 2.2 wurde vorausgesagt, dass sich eine zu hohe Grenzfrequenz negativ auf die Ortung auswirkt.

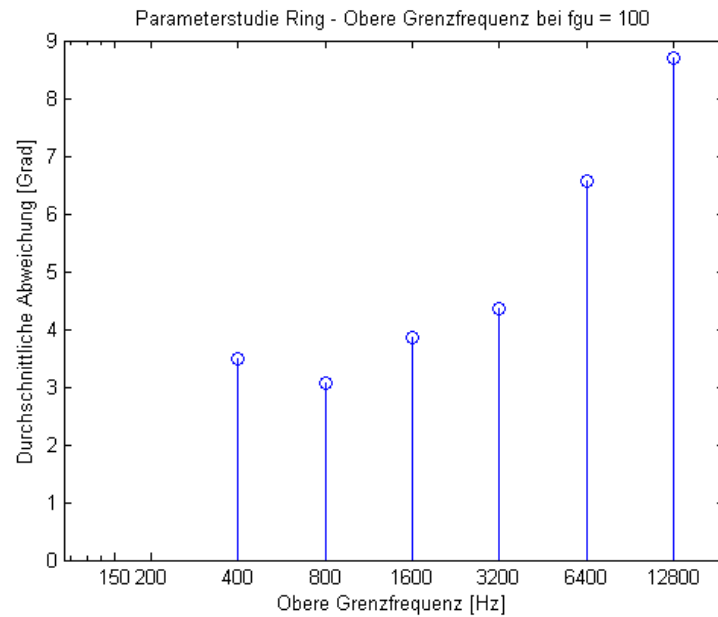


Abbildung 15: Ab einer Bandbreite von über 5 Oktaven, also einer oberen Grenzfrequenz von über 3200 Herz steigt der Fehler bei der Lokalisation der Lautsprecher im zweidimensionalen Array an. Im unteren Frequenzbereich erhält man erst ab der zweiten Oktave Werte.

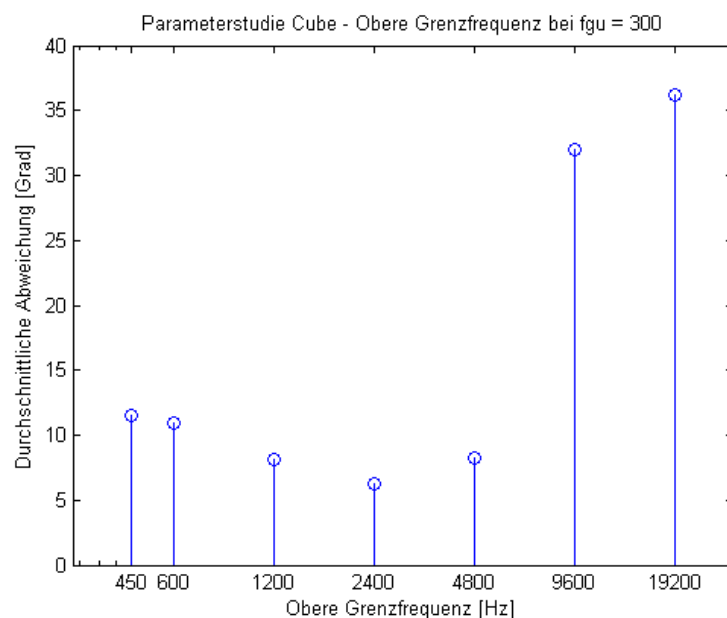


Abbildung 16: Auch bei der Lautsprecheranordnung im Cube sinkt bei einer zu hohen oberen Grenzfrequenz die Genauigkeit. Mit einer Bandbreite von 300 bis 4800 Herz können die Schallquellen noch sehr gut geortet werden. Erweitert man das Spektrum um eine Oktave, so können die Lautsprecherpositionen nicht mehr genau bestimmt werden.

## 4.4 Einfluss des Frequenzbereichs

Der Frequenzbereich wurde untersucht, indem die Bandbreiten aus den Tabellen 1 und 2 durch Variationen der unteren Grenzfrequenzen durch das Spektrum verschoben wurden. Die Auswirkungen darauf werden in den Abbildungen 15 und 16 gezeigt.

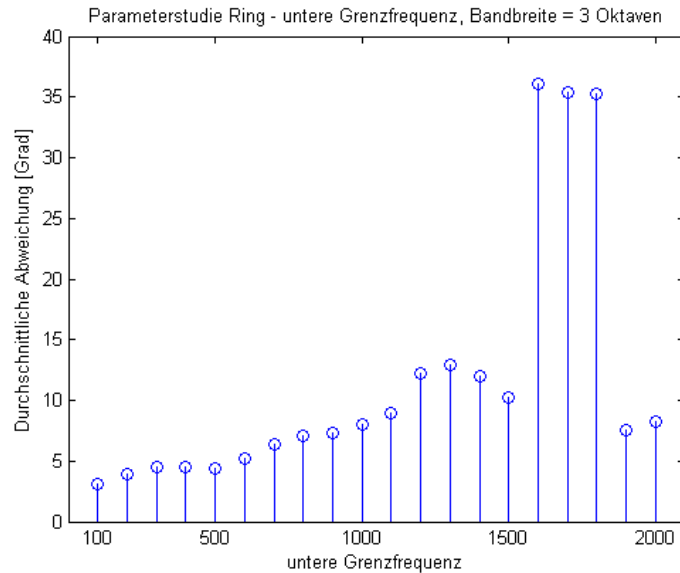


Abbildung 17: Das Verschieben der unteren Grenzfrequenz durch das Frequenzspektrum zeigt, dass die Lautsprecher des zweidimensionalen Arrays besonders gut im Frequenzbereich zwischen 100 Herz und 4800 Herz geortet werden können.

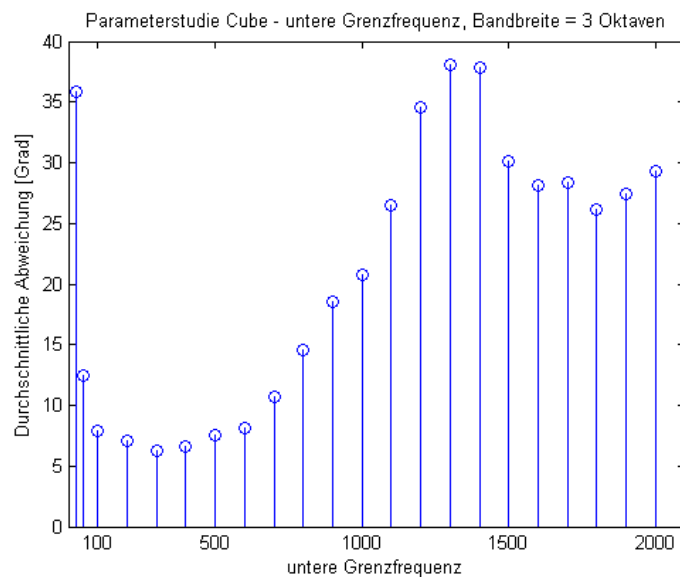


Abbildung 18: Auch für die Lautsprecher im dreidimensionalen Lautsprecherarray ist der beste Frequenzbereich für eine gute Lokalisation circa zwischen 100 Herz und 4800 Herz

Gute Werte für den Frequenzbereich liegen zwischen 100 Herz für die untere Grenzfrequenz und 4800 Herz (untere Grenzfrequenz 600 Herz + 3 Oktaven) für die obere Grenzfrequenz.

## 4.5 Anwendung der Parameter

Der in den Abbildungen 19 und 20 dargestellte Lautsprecherkreis wurde mithilfe eines Chebyshev Filters zweiter Ordnung berechnet. Durch diesen wurde das Signal mit den Grenzfrequenzen 200 und 800 Herz begrenzt und mit einer Glättung von 2 Samples geglättet. Die Form des Kreises ist sehr gut erkennbar und im dreidimensionalen Raum sind keine Abweichungen auf der z-Achse merkbar.

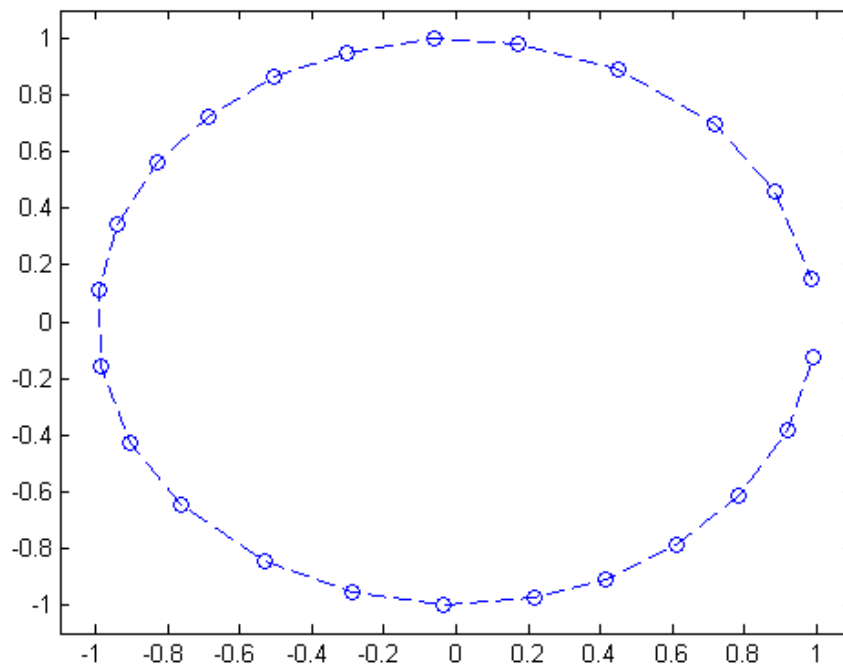


Abbildung 19: Lautsprecherring mit angepassten Werten

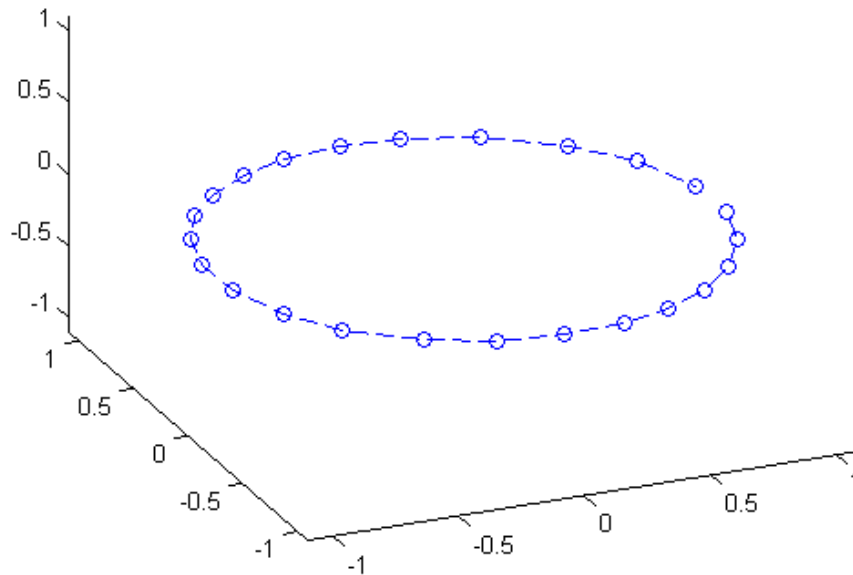


Abbildung 20: Lautsprecherring mit angepassten Werten. Auch im dreidimensionalen Raum hat sich die Ringstruktur verbessert.

Die Abbildungen 21 und 22 vergleichen die aus den akustischen Messungen berechneten Lautsprecherpositionen (rot, grün, blau) mit optisch gemessenen Werten (schwarz). Für die Filterung der Impulsantwort wurde dabei ein Chebyshev Filter dritter Ordnung mit den Grenzfrequenzen 300 und 2400 Herz verwendet. Auf das Glätten über mehrere Samples wurde verzichtet. Man erkennt, dass die berechneten Lautsprecherpositionen den Realen durchaus sehr nahe kommen. Bei der Betrachtung der einzelnen Ränge scheint es, als wären die Lautsprecher der Berechnung gegenüber der realen Situation verdreht. Das könnte darauf hindeuten, dass das Mikrofon bei der Aufstellung nicht exakt ausgerichtet war.

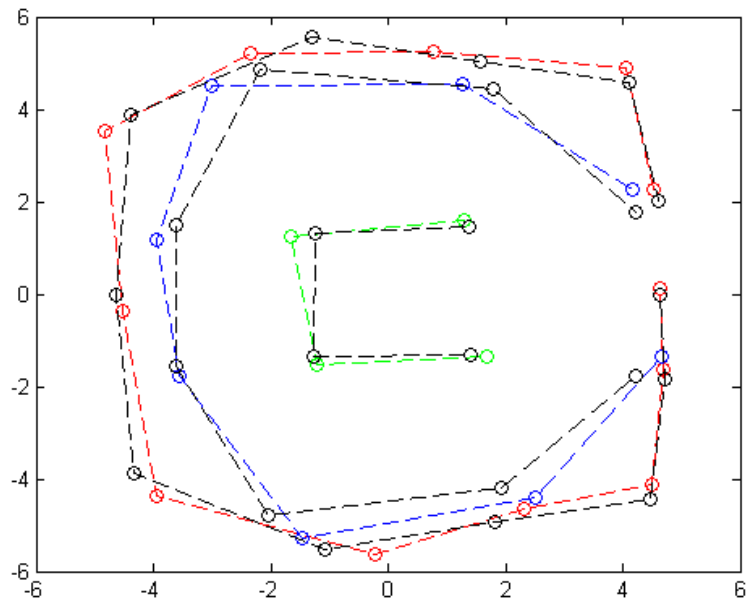


Abbildung 21: Vergleich der berechneten Lautsprecherpositionen mit den optisch gemessenen

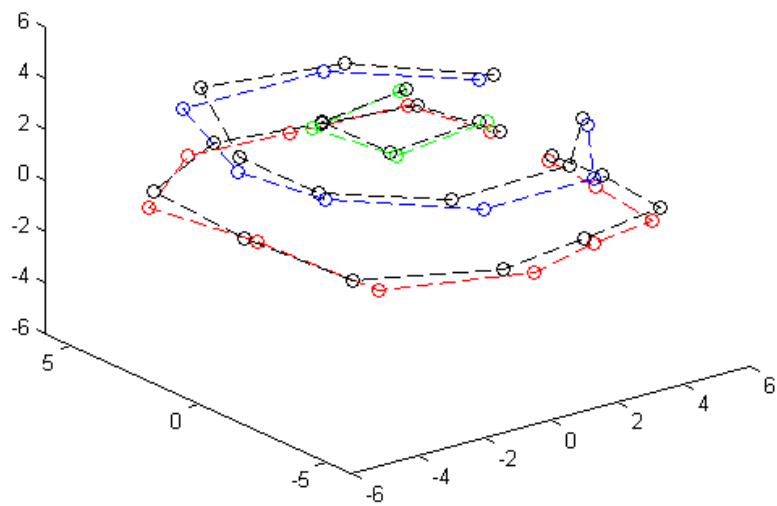


Abbildung 22: Vergleich der berechneten Lautsprecherpositionen mit den optisch gemessenen

## 5 Berechnung der Raumgeometrien über die ersten Reflexionen

Es wurde versucht, die Raumgeometrien des "Cube" über die ersten Reflexionen des Raums zu berechnen. Damit das funktioniert, mussten aber zuerst einige Bedingungen festgelegt werden:

- Der Raum muss annähernd quaderförmig sein.
- Es muss zumindest der Abstand zwischen einem Lautsprecher und dem Mikrofon bekannt sein, damit die Latenz des Systems berechnet werden kann.
- Um die möglichen Signale eingrenzen zu können, muss ein maximaler Abstand zwischen der Lautsprechermembran und der hinter dem Lautsprecher befindlichen Wand angegeben werden
- Da sich am Boden keine Lautsprecher befinden, muss die Mikrofonhöhe angegeben werden, um auch die von unten am Mikrofon einfallenden Signale eingrenzen zu können.
- Es sollte sich zumindest in jeder von den Mikrofonachsen aufgespreizten Ebene ein Lautsprecher positioniert sein.

### 5.1 Berechnung der Raumhöhe

Nach der Berechnung der Lautsprecherpositionen können die Mindestmaße des Raums über die Maximalwerte jeder Achsenrichtung und der gegebenen Mikrofonhöhe abgeschätzt werden. Durch das hinzufügen des maximalen Abstands zwischen Lautsprechermembran und der Wand dahinter, lassen sich auch Maximalwerte für die Dimensionen des Raums bestimmen.

Zuerst wird die Höhe des Raums berechnet. Dafür werden Lautsprecher gesucht, die sich annähernd auf der  $xy$ -Ebene der Mikrofonachse befinden - also auf gleicher Höhe, wie das Mikrofon. Der Schallstrahl  $a$  des Direktschalls und der am Boden oder an der Decke reflektierte Schallstrahl  $b$  bilden in diesem Fall ein annähernd gleichschenkliges Dreieck. So kann mithilfe des Satz von Pythagoras die Höhe vom Boden zum Mikrofon oder vom Mikrofon zur Decke mit

$$h = 2 \cdot \sqrt{b^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} \quad (5)$$

berechnet werden. Allerdings muss dafür zuerst die Länge der direkten Reflexion bestimmt werden. Über die bereits erhaltenen Raumabschätzungen lässt sich diese über

$$b_{max,min} = 2 \cdot \sqrt{a^2 + h_{min,max}^2} \quad (6)$$

eingrenzen. Mit den erhaltenen Werten wird eine Maske im Zeitbereich erstellt, die alle Werte der Impulsantwort außerhalb dieser Grenzen ausblendet. Zusätzlich wird auch der

Wertebereich für den Winkel  $\alpha$  zwischen Direktschall  $a$  und Reflexion  $b$  mithilfe der trigonometrischen Funktion

$$\alpha = \arccos\left(\frac{a/2}{b/2}\right) \quad (7)$$

eingeschränkt.

Nun werden die verbliebenen Werte der Impulsantwort untersucht, indem zuerst für die übrigen Spitzen im Zeitverlauf die Richtungsvektoren berechnet werden. Diese werden danach einer Plausibilitätsüberprüfung unterzogen: wird zum Beispiel eine Reflexion des Bodens gesucht, so muss die z-Koordinate negativ sein. Danach folgt eine Berechnung der Winkel des jeweiligen Signals mit den drei Raumebenen. Signale, die nicht in die zuvor definierten Wertebereiche passen werden eliminiert. Von den übriggebliebenen Ergebnissen wird der erste passende Wert als erste Reflexion gewertet. Damit kann über die Formel 5 die gesuchte Höhe festgestellt werden. Zuletzt werden für jeden Lautsprecher die Längen für die Entfernung vom Mikrofon zur Decke und vom Mikrofon zum Boden addiert und über alle Lautsprecher gemittelt. Lautsprecher, die nicht für beide Entfernungen Werte liefern, fallen weg.

## 5.2 Berechnung der Raumbreite und Raumtiefe

Bei der Berechnung der Werte für die x-Achse und die y-Achse des Raums wird zum Teil ähnlich vorgegangen, wie bei der Berechnung der Raumhöhe. Es werden wieder Lautsprecher ausgewählt, die sich möglichst auf der von den Mikrofonachsen aufgespannten xz- oder der yz-Ebene befinden. Dadurch lassen sich die Abstände zu den Wänden seitlich der Lautsprecher mit denselben Maßnahmen, die auch zur Bestimmung der Raumhöhe benutzt werden, berechnen. Zusätzlich werden auch noch die Reflexionen über die Wand hinter dem Lautsprecher und über die gegenüberliegende Wand miteinbezogen. Dazu werden wieder mit den Raumabschätzungen Grenzen festgelegt und alle Werte außerhalb dieser eliminiert. Da der Schallstrahl nur geringfügig von der Achse zwischen Lautsprecher und Mikrofon abweichen sollte, werden nur Signale gewertet, die in einem kleinen Winkel um die Achse auf das Mikrofon auftreffen. Sollte so kein Schallereignis übrig bleiben, wird der Winkel bis zu einem gewissen Grad weiter geöffnet.

Aus den Informationen der verbliebenen Signale lassen sich dann auch die gesuchten Längen berechnen. Zum Schluss wird wieder über alle erhaltenen Längen gemittelt.

Abbildung 23 zeigt den Betrag des "W-Signals" - die gefilterte Impulsantwort des omnidirektionalen Kanals von Lautsprecher 1. Dabei sind die zeitlichen Abschnitte markiert, in denen nach den Vorberechnungen die ersten Reflexionen erwartet werden.



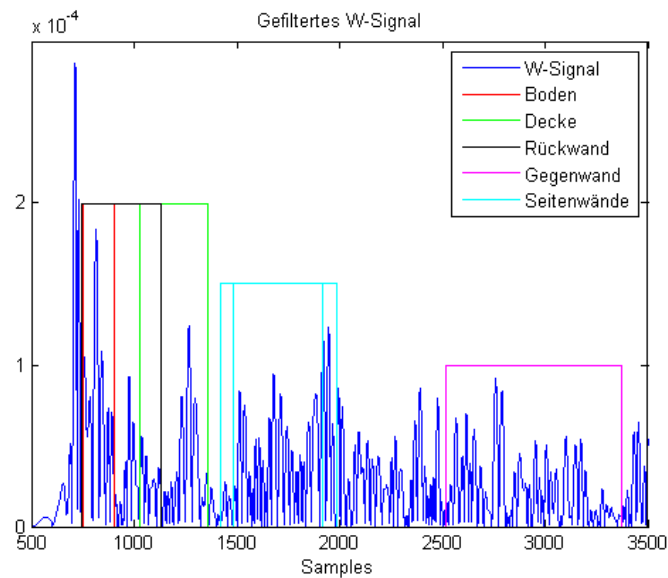


Abbildung 23: Betrag des "W-Signals" von Lautsprecher 1 mit eingezeichneten Zeitabschnitten in denen die jeweiligen Reflexionen erwartet werden

### 5.3 Vergleich der Ergebnisse für den Cube

Die Berechnungen ergeben für den Cube 11,69 Meter für die Raumtiefe, 11,62 Meter für die Raumbreite und 4,97 Meter für die Raumhöhe. Die Fläche des Raums beträgt demnach 135,84 Quadratmeter. Dafür wurde ein Chebyshevfilter zweiter Ordnung mit den Grenzfrequenzen 300 und 1200 Herz verwendet und auf die Glättung verzichtet. Angegeben ist der Raum mit 119,88 Quadratmetern, also um circa 12 Prozent kleiner als berechnet. Das kann damit zusammenhängen, dass der Cube nicht quaderförmig ist. Die Seitenflächen sind nicht normal zueinander und die Wände nicht gerade. Die Rückwand ist sogar gebogen.

## 6 Anwendung der Berechnungsmethode auf einen anderen Raum

Mittels Messdaten eines zweiten Raums sollte die Berechnungsmethode getestet werden. Dabei handelte es sich um Messsignale von insgesamt 40 Lautsprechern im Elisabeth-Herz-Kremenak-Saal des Congress Centrum Alpbach<sup>1</sup>. Derselbe Matlab-Code, der für die Berechnung des Cube verwendet wurde, lieferte für diesen Fall allerdings nur Ergebnisse für zwei Raumrichtungen. Aus diesem Grund wurde eine einfachere Version für die Auswahl der Reflexionen nach folgenden Kriterien angewendet:

<sup>1</sup><https://congressalpbach.com/de/461-elisabeth-herz-kremenak-saal>

- Die Untersuchung beschränkt sich wieder nur auf Lautsprecher, die sich annähernd auf den von Mikrofonachsen oder den von diesen aufgespannten Ebenen befinden.
- Es werden alle Peaks untersucht, die zeitlich nach dem Direktschallsignal dieser Lautsprecher detektiert werden.
- Die Richtungen, aus denen die Reflexionen erwartet werden, beschränken sich ebenso auf die Mikrofonachsen. So muss zum Beispiel eine Bodenreflexion eine negative z-Koordinate aufweisen. Das Vorzeichen für die x- und y- Koordinate muss mit denen des Direktschalls übereinstimmen. Alle Peaks, die dieses Kriterium nicht erfüllen werden aussortiert.
- Aus den restlichen Signalspitzen wird das Maxima zeitlich - mit der Annahme, dass die ersten Reflexionen nach dem Direktschall die höchsten Ausschläge im Signal verursachen - detektiert.

Die nachfolgenden Berechnungen der Raumabmessungen erfolgen nach derselben Methodik wie beim Cube. Die Höhe beträgt (nach Gleichung 5) 5,83 Meter. Die Berechnung der Länge und der Breite nach dieser Gleichung liefert aber zu kleine Werte. Die Fläche beträgt in diesem Fall 213,54 m<sup>2</sup>; verglichen mit dem auf der Homepage des Forum Alpbachs angegebenen Wert von 393 m<sup>2</sup> sind diese Längen viel zu klein. Berechnet man die Raummaße hingegen mithilfe der Reflexionen entlang der Raumachsen, so erhält man mit einer Fläche von 431,6 m<sup>2</sup> einen plausiblen Wert. Die Länge beträgt demnach 16,42 m und die Breite 26,29 m.

## 7 Rückschlüsse und Ausblick

Es hat sich gezeigt, dass sich mit der "Spatial Decomposition Method" und geeigneter Filterung die Richtungen des Direktschalls und der ersten Reflexionen für manche Messungen bzw. manche Räume sehr genau feststellen lassen. Weitere Reflexionen wurden aufgrund der hohen Komplexität nicht berechnet. Für den Nachhall ist aufgrund seiner Diffusität eine genaue Bestimmung der Richtung nicht nötig. Es konnten Raumgeometrien abgeschätzt werden aber zur Validierung der Genauigkeit empfiehlt sich die Messung weiterer Räume.

## Abbildungsverzeichnis

1	Das Soundfield ST450 [ <a href="http://www.musictech.net/2014/01/10mm-soundfield-microphones/">http://www.musictech.net/2014/01/10mm-soundfield-microphones/</a> ]	6
2	Berechnung der Lautsprecherpositionen aus SDM-Algorithmus 3D	7
3	Aufriss: Lautsprecherring aus gefiltertem SDM-Signal 2D	8
4	Lautsprecherring aus gefiltertem SDM-Signal 3D	9
5	Cube ohne Filter 2D	10
6	Cube ohne Filter 3D	10
7	Cube mit Filter 2D	11
8	Cube mit Fehler 3D	11
9	Cube mit Abständen 2D	12
10	Cube mit Abständen 3D	13
11	Ring: Filterordnung	15
12	Cube: Filterordnung	15
13	Ring: Glättung	16
14	Cube: Glättung	17
15	Ring: Bandbreite	18
16	Cube: Bandbreite	18
17	Ring: Frequenzbereich	19
18	Cube: Frequenzbereich	19
19	Ring aus gute Werten 2D	20
20	Ring aus guten Werten 3D	21
21	Cube: Vergleich der berechneten Lautsprecherpositionen mit den optisch gemessenen 2D	22
22	Cube: Vergleich der berechneten Lautsprecherpositionen mit den optisch gemessenen 3D	22
23	W-Signal Lautsprecher 1 mit Reflexionszeiten	25

## Tabellenverzeichnis

1	Beste Parameterwerte für Lautsprecherring	14
2	Beste Parameterwerte für Cubelautsprecher	14

## Literatur

- [1] Robert Höldrich Alois Sontacchi. "Schallfeldreproduktion durch ein verbessertes Holo-phonie – Ambisonic System". In: *Tagungsband der 21. Tonmeistertagung, VDT, Hannover*, (Nov. 2000).
- [2] Franz Zotter Matthias Frank. "Spatial impression and directional resolution in the reproduction of reverberation". In: *Fortschritte der Akustik, DAGA (Hamburg)* (2016).
- [3] Ville Pulkki. "Spatial Sound Reproduction with Directional Audio Coding". In: *J. Audio Eng. Soc.*, Vol55, No. 6 (Juni 2007).